



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

**LNG 화물창 내 슬로싱  
충격하중의 Outlier 처리 방법 및  
장기 예측 절차 개발**

**Development of Long-term Prediction Procedure  
and Outlier Analysis for Sloshing Impact Loads on  
LNG Cargo Tank**

2017년 8월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

김 상 엽



## 초 록

본 논문은 실험적 접근법을 이용한 LNG 화물창 내 슬로싱 하중의 장기 예측 절차 개발에 관한 내용을 다루고 있다. 최근 기술의 고도화와 경제성의 이유로 LNG 운반선이 점차 대형화 되는 추세이며 이에 따라 LNG 저장탱크의 크기도 자연스레 커지게 되었다. 탱크의 크기가 커짐에 따라 탱크 내부유동의 공진주기는 선박의 운동주기에 더욱 가까워지게 되었고, 이로 인해 슬로싱 하중에 대한 해석은 선박의 설계단계에서 고려되어야 할 필수 항목이 되었다.

슬로싱 문제의 실험적 접근법에 대한 기존의 많은 연구들이 있었고 최근 각 국제 선급들에서 해석방법에 대한 가이드를 제시하고 있다. 그러나 각 기관에서 제안하는 해석 절차가 서로 달라 실험 조건의 선정, 실험 분비 및 실험 방법 등에 대한 기준이 불명확하여 모든 기관의 기준을 만족하는 실험을 수행하기에 어려움이 있다. 또한 실험결과를 바탕으로 설계하중을 도출하는 절차 또한 차이가 있어 같은 실험 데이터를 바탕으로 서로 다른 결과를 도출할 가능성이 있었다.

본 연구에서는 슬로싱 하중 장기 예측을 절차를 개발한다. 모형실험을 통한 슬로싱 하중 장기 예측에 있어 슬로싱 해석조건 선정, 모형실험 수행, 실험결과의 해석 등의 주요 사안과 관련하여 국내조선소 및 국제선급이 공통적으로 합의할 수 있는 수준의 절차 구축을 목표로 하였다. 이를 위해 기존에 정립된 국제 선급 및 국내 조선소의 슬로싱 해석 절차들을 조사하여 기존의 절차들의 공통점 및 문제점을 파악, 해석 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 개선된 장기 슬로

싱 하중 예측 절차를 제안하였다.

이렇게 제안한 슬로싱 하중의 장기 예측 절차를 기반으로 하여 실제 운항중인 LNG 운반선의 화물창에 대한 장기 슬로싱 하중을 추정하였다. 개발된 절차를 따라 도출한 장기 슬로싱 하중 결과를 동일한 모델에 대하여 기존의 하중 예측 절차를 적용한 결과와 비교하여 본 연구에서 제안하는 슬로싱 하중의 장기 예측 방법의 효용성을 검토하였다. 본 연구에서 제안하는 데이터 해석방법을 적용시 동일한 실험결과를 바탕으로 기존의 방법보다 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있음을 장시간 모형실험 데이터를 바탕으로 확인하였다.

주요어: 슬로싱, 슬로싱 모형실험, 장기 예측, 후처리, 통계해석, 수렴성

학번: 2012-30284

## 목 차

<b>1. 서론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 주요 연구 내용 .....	3
<b>2. 기존 LNG 화물창 내 슬로싱 하중 예측 절차 분석 .....</b>	<b>5</b>
2.1 국제 선급들의 하중 예측 절차 .....	5
2.1.1 ABS의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	6
2.1.2 BV의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	11
2.1.3 DNV-GL의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	14
2.1.4 LR의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	18
2.2 국내 조선소의 해석절차 .....	23
2.2.1 대우조선해양의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	23
2.2.2 삼성중공업의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	26
2.2.3 현대중공업의 슬로싱 하중 예측 절차 .....	28
2.3 주요 핵심 기술 및 문제점 분석 .....	31
2.3.1 모형 실험 조건 스크리닝 .....	31
2.3.2 각 기관의 모형실험 및 하중예측 절차의 통일성 부재 .....	33
2.3.3 슬로싱 모형실험 결과의 수렴성 .....	36
<b>3. 슬로싱 하중 장기 예측 절차 개발 .....</b>	<b>38</b>
3.1 장기 예측 절차 개요 .....	38

3.2 선박의 운동 해석 및 슬로싱 모형 실험 조건의 선정 .....	40
3.2.1 선박 내 화물창 및 적재 조건 선정 .....	40
3.2.2 해양파 조건의 선정 .....	41
3.2.3 선속 조건의 선정 .....	43
3.2.4 모형 실험 테이블의 작성 .....	43
3.2.5 운동 해석 .....	44
3.2.6 탱크 운동 시계열 생성 .....	45
3.3 슬로싱 모형실험 .....	47
3.3.1 운동 플랫폼 .....	47
3.3.2 화물창 모형 .....	48
3.3.3 압력센서 .....	51
3.3.4 영상 계측 .....	55
3.4 압력 데이터의 통계 해석 .....	57
3.4.1 데이터 필터링 .....	57
3.4.2 압력 데이터의 평균화 .....	57
3.4.3 슬로싱 충격 표본 추출 / 이상화 .....	58
3.4.4 차순정렬 및 통계량 추정 .....	62
3.4.5 극치 분포함수 근사 .....	63
3.4.6 이상치의 정의 .....	68
3.4.7 비관심 이상치 분석 .....	70
3.4.8 함수근사 이상치 분석 .....	75

3.4.9 극치 하중 추정.....	79
3.4.10 슬로싱 하중의 장기확률분포 추정 .....	80
<b>4. 138k LNG 운반선 화물창의 슬로싱 하중 장기 예측.....</b>	<b>81</b>
4.1 적용 모델 및 조건.....	81
4.1.1 화물창 모델.....	81
4.1.2 실험 조건.....	83
4.1.3 탱크 운동 시계열 생성 .....	85
4.2 모형 실험.....	91
4.2.1 운동 플랫폼.....	92
4.2.2 압력센서.....	94
4.2.3 DAQ 시스템.....	99
4.3 실험시간 민감도 연구.....	102
4.3.1 장시간 모형실험 수행.....	102
4.3.2 실험결과의 수렴성 검토.....	103
4.3.3 함수근사 이상치의 방법론 검토.....	107
4.4 슬로싱 하중 장기 예측 및 분석.....	130
4.4.1 슬로싱 충격압력 신호의 특성.....	130
4.4.2 장기 슬로싱 하중 예측.....	133
4.5 기존 절차와의 비교.....	150
4.5.1 실험 기준 시간에 따른 장기 슬로싱 하중 비교.....	150
4.5.2 이상치 분석 여부에 따른 장기 슬로싱 하중	



비교 .....	159
5. 결론 .....	167
6. 참고문헌 .....	170

## 표 목 차

Table 2-1 40-year and 1-year waves for sloshing model test conditions (ABS, 2014) .....	9
Table 2-2 Screening methods for selecting model test condition.....	32
Table 2-3 Difference in standards for experiment conditions proposed by each institution, filling depth condition.....	34
Table 2-4 Difference in standards for experiment conditions proposed by each institution, sea state condition.....	35
Table 2-5 Simulation time recommended by each institution (full scale).....	35
Table 2-6 Recommended panel size (full scale).....	36
Table 2-7 Methods to improve convergence of model test results .....	37
Table 3-1 Consideration of cargo tank and filling depth condition .....	41
Table 3-2 Consideration of wave condition (screening phase) .....	42
Table 3-3 Determination of ship speed.....	43
Table 3-4 Simulation time of each test condition.....	44
Table 3-5 Seakeeping analysis for sloshing model test .....	45
Table 3-6 Generation of time history of tank motion .....	46
Table 3-7 Requirement of tank model for sloshing test .....	51
Table 3-8 Requirements related with pressure sensor for sloshing test.....	53
Table 3-9 Categorization of potential outliers .....	70
Table 4-1 Specific dimension of manufactured tank model .....	81
Table 4-2 Summary of test condition .....	83
Table 4-3 Simplified wave scatter diagram for high filling condition .....	84
Table 4-4 Simplified wave scatter diagram for low filling condition .....	84
Table 4-5 Performance of 6DOF motion platform (midsize – 5ton).....	94
Table 4-6 Technical data of 211B5 sensor.....	95
Table 4-7 Technical data of PXI-4495.....	100

Table 4-8 Technical data of coupler .....	101
Table 4-9 Test condition of long-time simulation .....	103
Table 4-10 Comparison of number of sloshing peaks with various significant wave height condition, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5sec .....	138
Table 4-11 Comparison of probable extreme pressures based on 5hour and 10hour test data, w/ outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg	153
Table 4-12 Comparison of probable extreme pressures based on 5hour and 10hour test data, w/ outlier analysis, filling=0.15H, heading=90deg..	158
Table 4-13 Comparison of fitting parameters, w/o & w/ outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08.....	162

## 그 립 목 차

Fig. 2-1 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, ABS.....	7
Fig. 2-2 Strength assessment based on damage index (ABS, 2014) .....	11
Fig. 2-3 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, BV .....	13
Fig. 2-4 Consideration of confidence intervals in the estimation of sloshing load (BV, 2011) .....	14
Fig. 2-5 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, DNV-GL .....	15
Fig. 2-6 Comparison of pressure distributions for static load and loads including dynamic amplification factor (DNV-GL 2016) .....	18
Fig. 2-7 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, LR .....	19
Fig. 2-8 Assessment using structural reliability analysis of LR (LR 2009) ..	22
Fig. 2-9 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, DSME .....	25
Fig. 2-10 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, SHI.....	28
Fig. 2-11 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, HHI .....	30
Fig. 3-1 Proposed flowchart for evaluation of design sloshing loads .....	39
Fig. 3-2 Investigation of influence of tank vibration on measured sloshing pressure .....	50
Fig. 3-3 Example of hotspots of sloshing impact.....	53
Fig. 3-4 Locality of sloshing impact - time history of pressures of 3x3 sensors located at the same cluster panel, filling depth=0.70H, tank roof .....	54
Fig. 3-5 Example of recording free surface movement of model test using earth-fixed camera.....	56
Fig. 3-6 Averaging of pressure data of 3x3 sensors: single (left), 2x2 (middle), and 3x3 sensors (right) .....	58
Fig. 3-7 POT method for single channel data .....	59
Fig. 3-8 POT method for multiple channel data.....	60

Fig. 3-9 Definition of rise time & decay time .....	62
Fig. 3-10 Pressure peaks due to small droplet.....	72
Fig. 3-11 Spatial distribution of pressure data when droplet hit the 3x3 cluster panel .....	72
Fig. 3-12 Impact at the higher corner of side wall due to droplets, harmonic motion test using 2D tank.....	73
Fig. 3-13 Flowchart of non-interesting outlier analysis method .....	73
Fig. 3-14 Magnitude of pressure peak and rise impulse area of measured pressure data.....	74
Fig. 3-15 Flowchart of ‘fitting-outlier’ analysis.....	76
Fig. 3-16 Example of fitting outlier analysis.....	79
Fig. 4-1 Cargo tank of 138k LNGC, 1/50 scale model .....	82
Fig. 4-2 Motion response of 138k LNG carrier, $Fn=0.05$ .....	89
Fig. 4-3 Time history of 6dof tank motion in irregular sea condition and sloshing-induced dynamic pressure, model scale.....	90
Fig. 4-4 Schematic diagram of measurement system for sloshing model test	92
Fig. 4-5 Stewart type motion platform, 5ton capacity.....	93
Fig. 4-6 Configuration of 211B5 sensor (KISTLER).....	95
Fig. 4-7 Arrangement of pressure sensor at cluster panel .....	96
Fig. 4-8 Position of cluster sensor panels.....	97
Fig. 4-9 Installation of sensor and cable .....	97
Fig. 4-10 Specific channel number of each cluster panel.....	99
Fig. 4-11 Data acquisition device, PXI-4995 (National Instruments).....	100
Fig. 4-12 Piezoelectric sensor power supply/coupler (KISTLER).....	101
Fig. 4-13 Exceedance probability of sampled sloshing peak for repeat test, filling=0.95H, heading=150deg, $T_z=9.5s$ , $H_s=12.5m$ .....	105
Fig. 4-14 Exceedance probability of sampled sloshing peak for repeat test,	

filling=0.20H, heading=90deg, Tz=7.5s, Hs=7.5m.....	107
Fig. 4-15 Comparison of analysis results based on various fitting methods, filling=0.95H, P06, tank roof .....	109
Fig. 4-16 Comparison of flowchart of two different fitting-outlier analysis method.....	111
Fig. 4-17 Comparison of probability of exceedance when applying different outlier handling method, filling=0.95H, Run No.18, P06.....	113
Fig. 4-18 Comparison of probability of exceedance distributions according to outlier analysis method, channels on P06, filling=0.95H .....	115
Fig. 4-19 Comparison of probability of exceedance when applying different outlier handling method, accumulate 20 repeat test results, filling=0.95H, P06.....	117
Fig. 4-20 Box-plot showing the distribution of location parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06.....	119
Fig. 4-21 Box-plot showing the distribution of scale parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06 .....	120
Fig. 4-22 Box-plot showing the distribution of shape parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06 .....	121
Fig. 4-23 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06 .....	122
Fig. 4-24 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P02 .....	123
Fig. 4-25 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P05 .....	124
Fig. 4-26 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P08 .....	125
Fig. 4-27 Box-plot showing the distribution of location parameters	

according to application of outlier analysis, filling=0.20H.....	127
Fig. 4-28 Box-plot showing the distribution of scale parameters according to application of outlier analysis, filling=0.20H.....	128
Fig. 4-29 Box-plot showing the distribution of shape parameters according to application of outlier analysis, filling=0.20H.....	129
Fig. 4-30 Representative impact signals from model test, filling=0.15H, Tz=6.0s, Hs=5.0m, P18, side wall.....	131
Fig. 4-31 Representative impact signals from model test, filling=0.15H, Tz=6.0s, Hs=5.0m, P13, upper chamfer.....	131
Fig. 4-32 Snapshot of sloshing test, filling=0.15H, Tz=6.0s, Hs=5.0m.....	132
Fig. 4-33 Representative impact signals from model test, filling=0.95H, Tz=7.5s, Hs=11.1m.....	133
Fig. 4-34 Bar chart of probable extreme pressures with 3hour return period of various wave conditions, filling=0.95H, heading=150deg .....	137
Fig. 4-35 Natural period of model tank, real scale.....	138
Fig. 4-36 Comparison of probability of sloshing pressure with various significant wave height condition, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5sec .....	139
Fig. 4-37 Long-term probability distribution of sloshing load, filling=0.95H, heading=150deg, data accumulated from 1x1 single sensor.....	142
Fig. 4-38 Long-term probability distribution of sloshing load, filling=0.95H, heading=150deg, NxN averaged from P06 .....	143
Fig. 4-39 Bar chart of probable extreme pressures with 3hour return period of various wave conditions, filling=0.15H, heading=90deg .....	146
Fig. 4-40 2D and 3D harmonic motion test, filling=0.15H, P18.....	147
Fig. 4-41 Wave breaking before sloshing impact on the tank side wall, 0.15H, harmonic roll motion .....	148

Fig. 4-42 Long-term probability distribution of sloshing load, filling=0.15H, heading=90deg .....	150
Fig. 4-43 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, P06 .....	152
Fig. 4-44 Comparison of short-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=6.0s, Hs=3.5m, P06 .....	153
Fig. 4-45 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, w/o outlier analysis, filling=0.15H, heading=90deg, P18 .....	156
Fig. 4-46 Comparison of short-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, filling=0.15H, heading=90deg, Tz=6.5s, Hs=3.5m, P18 .....	157
Fig. 4-47 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, P12 .....	160
Fig. 4-48 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5s, Hs=7.5m, P12 .....	161
Fig. 4-49 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, P08 .....	162
Fig. 4-50 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08 .....	163
Fig. 4-51 Representative impact signals from model test, filling=0.95H, Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08 .....	164
Fig. 4-52 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load,	



w/ and w/o outlier analysis with two different fitting methods,  
filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08..... 166

# 1. 서론

## 1.1 연구 배경

슬로싱 (sloshing)이란 탱크 내부에 부분적으로 적재된 유체가 외부 기진력으로 인해 자유표면의 변화를 일으키는 현상을 뜻하며, 내부 유동의 공진주기가 선박의 운동주기에 가까울수록 슬로싱 현상은 더욱 심하게 일어난다. 유체역학 분야에서 슬로싱 문제는 오랜 기간 동안 많은 연구자들에 의해 연구 되어왔다. 1970년대와 1980년대에 걸쳐 액화천연가스 (LNG) 선박의 설계에 관한 많은 연구들이 수행되었고, 1990년대 말에 이르러 145K급 선박이 LNGC시장에서 보편화 되었다. 2000년대 초에 이르러 LNG 선의 크기는 급격하게 증가하여 2000년대 말에는 180K급 선박이 나타났다. 멤브레인 (membrane) 형태의 화물창을 가진 LNG 운반선(LNGC)과 LNG-FPSO (FLNG) 등과 같은 해양구조물에서 발생하는 슬로싱 현상은 화물창 내부에 큰 충격을 발생시켜 구조물에 손상을 입힐 가능성이 크다. 따라서 슬로싱 현상이 야기하는 충격압력의 정확한 예측은 화물창 설계의 핵심 요소 중 하나이며 이에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있으나, 기존의 많은 연구에도 불구하고 슬로싱 충격압에 대한 예측과 이에 따른 구조적 응답에 대한 분석은 현재 선박 건조 기술 수준에 비해 미흡한 상황이다.

슬로싱 유동의 해석은 물리현상의 복잡한 비선형성으로

인하여 충격 압력의 예측에 있어 해석적 또는 수치적인 접근 방법보다 실험을 이용한 접근 방법이 선호되어 왔다. 슬로싱 모형 실험의 주요 관심사는 불규칙 해상상태에서 운항하는 LNG 운반선박의 화물탱크에 작용하는 충격압력을 예측하는 것이다. 이를 위해 선박의 운동을 모사할 수 있는 동요기에 축소 모형 탱크를 설치하고 탱크 내에 압력센서를 부착하여 유체 충격 압력을 계측하는 방법으로 실험이 수행된다. 일찍이 Mathiesen (1976)과 Gran (1981)은 슬로싱 문제의 통계 해석에 선구적인 업적을 남겼다. Mathiesen (1976)은 불규칙 중동요 운동 모형시험을 수행하여 그 결과를 Weibull 분포함수에 적용한 통계해석을 수행하였다. Gran (1981)은 모형시험 결과를 Frechet 분포 함수에 적용시켜 통계해석을 수행하였다. Graczyk et al. (2006, 2008)은 선박 운동해석, 모형 시험, 결과분석, 구조응답, 통계해석에 이르는 슬로싱 문제 분석의 체계적인 방법을 제시하였다.

앞선 연구들에 힘입어 현재 많은 국제 선급들은 슬로싱 설계하중 예측을 위한 자사 가이드 혹은 프로시저를 발표하였다. 국제 선급들의 프로시저는 모형실험을 통해 슬로싱 하중을 추정한다는 점에서는 공통점을 보이지만, 모형실험을 수행하는 방법과 실험데이터를 해석하는 방법, 해석된 데이터를 바탕으로 슬로싱 설계 하중을 추정하는 방법 등에서 차이를 보인다. 또한 프로시저를 그대로 따라 하중해석을 수행하기에 현실적인 어려움이 있거나 구체적인 절차를 언급하지 않고 있는 부분들도

다소 있어, 실제로 화물창을 설계, 제작해야 하는 조선소와 의견을 조율하는 과정에서 어려움을 겪는 경우 또한 발생하는 것으로 알려져 있다.

## 1.2 주요 연구 내용

본 논문은 다음과 같은 항목에 대해 연구를 수행하였다.

### 1) 기존의 LNG 화물창 내 슬로싱 하중 예측 절차 분석

국제 선급 및 국내 조선소들의 슬로싱 하중 예측 절차를 정리하여 각 기관의 절차가 갖는 주요 핵심 기술을 파악하고, 주요 기술에 대한 배경을 살펴보았다. 또한 여러 기관의 해석 절차 비교를 통해 현재의 슬로싱 하중 예측 절차가 갖는 문제점을 분석하였다. 실제로 LNG 화물창에 대한 면밀한 슬로싱 하중 해석을 위해서는 화물창의 구조해석을 통한 강도평가의 단계가 포함되어야 하지만 본 연구에서는 화물창의 강도평가 이전단계인 슬로싱 설계 하중 예측 단계까지만을 다루도록 한다.

### 2) 슬로싱 하중 장기 예측 절차 개발

본 연구에서는 슬로싱 하중 장기 예측을 절차를 개발한다. 본 절차 개발의 목적은 모형실험을 통한 슬로싱 하중 장기 예측에

있어 슬로싱 해석조건 선정, 모형실험 수행, 실험결과의 해석 등에 대하여 현실적으로 수행 가능한 수준의 절차를 구축을 목표로 한다. 앞서 분석한 각 기관의 슬로싱 해석 절차들을 바탕으로 하여 기존의 절차들의 문제점을 파악, 해석 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 장기 슬로싱 하중 예측 절차를 제안하였다. 또한 본 논문에는 수렴성이 부족한 실험값에 대하여 통계해석을 통해 수렴성을 개선할 수 있는 방법인 이상치 해석 (outlier analysis)법을 개발하였으며, 이를 장기 슬로싱 하중 예측 절차에 포함하였다.

### 3) 실제 운항중인 LNG 운반선의 화물창에 본 연구에서 개발한 하중 예측 절차 적용

본 논문에서 제안한 슬로싱 하중의 장기 예측 절차를 기반으로 하여 실제 운항중인 LNG 운반선의 화물창에 대한 장기 슬로싱 하중을 추정하였다. 개발된 절차를 따라 도출한 장기 슬로싱 하중 결과를 동일한 모델에 대하여 기존의 하중 예측 절차를 적용한 결과와 비교하여 본 연구에서 제안하는 슬로싱 하중의 장기 예측 방법의 효용성을 검토하였다. 연구에 사용된 모델은 138K LNG 운반선의 2번 탱크의 1/50 축척모델이며 LNG 운반선의 적재깊이 제한을 고려하여 높은 적재깊이 조건과 낮은 적재깊이 조건의 두 가지 적재 조건에 대하여 하중 해석을 수행하였다.

## 2. 기존 LNG 화물창 내 슬로싱 하중 예측 절차 분석

### 2.1 국제 선급들의 하중 예측 절차

본 장에서는 국제 선급들의 슬로싱 하중 예측 절차를 살펴본다. 살펴본 4개 기관 모두 수치해석이 아닌 모형 실험을 수행하고, 이를 통해 얻은 압력 시계열을 바탕으로 슬로싱 하중을 예측한다는 공통점이 있다. 아래에 각 기관의 슬로싱 하중 예측 절차를 요약하여 정리하였다. 각 선급들이 설명하는 슬로싱 하중 예측 절차는 단순히 하나의 제안 사항일 뿐 반드시 본 절차를 따를 필요는 없으며, 다른 합리적인 대안이 있다면 선급과의 논의 하에 적용 가능하다고 언급하고 있다.

덧붙여 본 장에서는 각 선급 별 슬로싱 모형 실험법 및 슬로싱 하중 예측절차의 특징만을 살펴보았으며, 구조해석을 통한 화물창의 강도평가에 대한 내용은 다루지 않았다. 각 기관이 권고하는 하중 예측 절차의 차이는 직접적으로 화물창의 설계 결과의 차이로 이어지는 것은 아니며 각 기관이 따르는 구조 강도 평가 및 구조 scantling 방식에 의해 최종적인 화물창 설계 결과는 크게 다르지 않을 가능성이 있다.

### 2.1.1 ABS 의 슬로싱 하중 예측 절차

ABS의 슬로싱 하중 예측 절차에 대한 흐름도를 아래의 그림에 나타내었다. 기본적으로 ABS는 설계 슬로싱 하중을 장기 확률에서  $10^{-8}$ 의 초과확률 수준에 기초하여 정의할 것을 권고하고 있다. 슬로싱 하중의 경우 높은 비선형성으로 인해 선박의 운동과는 달리 스펙트럼에 기반한 장기 통계 해석법을 적용할 수 없으므로, 장기간 극한값을 추정하기 위해 등가 단기 접근법 (equivalent short-term approach)를 적용할 것을 권고하고 있다. 등가 단기 접근법은 선박의 수명 기간 동안 발생할 수 있는 가장 위험한 환경조건에 상응하는 불규칙한 탱크 운동시의 슬로싱 해석을 수행함으로써, 이때 발생하는 슬로싱 하중을 바탕으로하여 장기 슬로싱 하중을 예측하는 방법이다. 이때 가장 위험한 환경, 즉 설계 환경조건을 선정하기 위해서는 특정 환경조건에서의 슬로싱 하중의 크기를 가늠할 수 있어야 하며, 결과적으로 여러 설계 환경조건 후보 군들에 대한 슬로싱 해석을 수행한 다음에야 판단이 가능하다. 등가 단기 접근법은 선박이 겪게 될 모든 경우에서의 슬로싱 하중 정보를 필요로 하지 않아 장기 예측 방법에 비하여 비하여 슬로싱 해석을 수행해야 하는 조건의 수가 적다는 장점이 있다.

슬로싱 해석은 모형실험 혹은 수치적 방법으로 수행이 가능하며, 현재까지는 모형실험을 통한 슬로싱 해석이 가장 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. ABS 또한

모형실험을 통한 슬로싱 해석을 전제로 하여 하중 예측 절차를 제안하고 있으며 그 절차를 정리하여 Fig. 2-1에 흐름도의 형태로 나타내었다.

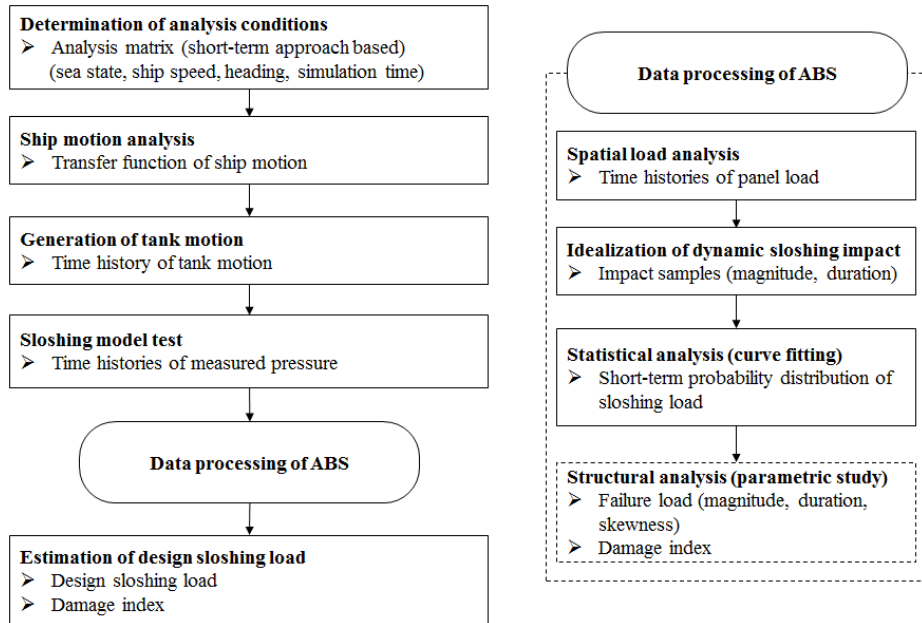


Fig. 2-1 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, ABS

가장 먼저 수행해야 하는 것은 슬로싱 해석 즉 모형실험을 수행할 조건들을 선정하는 것이다. 우선 모형 실험을 수행할 조건들은 선박이 지정된 수명 동안 만날 수 있는 가장 심한 폭풍을 나타내는 해상상태로 선정한다. 해상상태는 선수각 (heading angle) 조건에 따라 다르게 적용된다. 선박이 흔히 겪게 될 선수파 (head sea) 조건의 경우 재현기간 40년의 높은 파고조건을 적용할 것을 권고하고 있으며, 횡파 (beam sea) 조건의



경우 비교적 완만한 재현기간 1년의 파고조건을 사용할 것을 권고한다. 아래의 Table 2-1에 특성과주기에 따른 40년 주기 파와 1년 주기 파의 파고를 정리하여 나타내었다. 표에서  $T_z$ 는 특성과 주기,  $H_s$ 는 유의파고를 의미한다. 해양조건은 장파정해양파 (long-crested wave)를 사용할 것을 권고하며, 보다 현실적인 단파정해양파 (short-crested wave)에 비하여 보다 큰 운동응답을 주기 때문에 보수적인 측면에서 슬로싱 하중을 추정 할 수 있기 때문이다.

슬로싱 실험을 수행할 조건들이 선정되면 해당 조건에 대한 모형실험을 수행하여 각 환경조건에서의 슬로싱 하중의 단기 극한값을 평가한다. 슬로싱 하중의 단기 극한값을 평가하기 위해서는 실험을 통해 계측한 압력데이터의 통계해석이 요구되며 그 과정은 각 기관마다 차이가 있다. ABS의 경우 각 환경조건에 대해 실선기준 5 시간 동안 모형실험을 수행하며, 획득한 데이터를 바탕으로 아래와 같은 데이터 후처리 과정을 거친다.

- 1) 클러스터화 한 압력센서 패널 신호의 평균화
- 2) 패널 압력신호의 이상화 (삼각형 형태)
- 3) 극치분포함수 근사를 통한 단기 극한 슬로싱 하중 예측
- 4) 각 압력신호의 손상지수 (damage index) 평가

여기서 단기 극한 슬로싱 하중이란 실선기준 5시간 실험을 통해 획득한 슬로싱 충격하중을 바탕으로 추정한 초과확률 수준  $10^{-3}$

압력값을 의미한다.

Table 2-1 40-year and 1-year waves for sloshing model test conditions  
(ABS, 2014)

Tz (sec)	Hs (m)	
	40-year Waves	1-year Waves
4.0	1.9	0.5
4.5	3.1	1.6
5.0	4.4	2.7
5.5	5.9	3.8
6.0	7.3	5.0
6.5	8.7	6.2
7.0	10.0	7.3
7.5	11.1	8.3
8.0	12.1	9.2
8.5	13.0	10.0
9.0	13.8	10.6
9.5	14.4	11.1
10.0	14.9	11.5
10.5	15.2	11.8
11.0	15.5	12.0
11.5	15.7	12.0
12.0	15.8	12.0
12.5	15.8	11.8
13.0	15.7	11.5
13.5	15.5	11.0
14.0	15.3	10.3
14.5	14.9	9.3
15.0	14.5	7.4

ABS의 경우 단순히 특정 초과확률에서의 슬로싱 하중 추정뿐 아니라 구조물의 파괴모드에 대한 매개변수 연구를

바탕으로 손상 지수를 도출하여 이를 구조강도 평가에 이용한다. 손상지수를 결정하는 매개변수는 압력신호의 이상화를 통해 도출한 충격압력의 크기 ( $P$ ), 상승 시간 ( $T_{rise}$ ), 지속 시간 ( $T_{duration}$ ), 와도 ( $S$ )이다. 압력시간의 이상화에 대한 내용은 본문의 후반부에 자세히 다루도록 하겠다. 지속시간이 짧은 슬로싱 충격하중의 동적인 특성으로 인해 화물창 구조에 미치는 충격하중의 영향은 충격하중의 모양 및 지속시간에 따라 달라진다. 그러므로 각 슬로싱 충격의 중요도는 단순히 충격의 크기가 아닌 화물창의 구조응답을 기준으로 평가되어야 하며, 이러한 이유로 ABS는 각 충격이 구조응답에 미치는 영향의 정도를 평가하기 위해 손상지수를 도입하였다. ABS가 제안한 손상지수는 충격하중의 크기, 지속시간, 와도의 함수로 정의되며 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$D_i = \frac{P_i}{P_{failure}(S_i, T_{duration,i})} \quad (2-1)$$

여기서  $D_i$ 는  $i$ 번째 충격신호의 손상지수,  $P_i$ 는 충격압력의 크기,  $S_i$ ,  $T_{duration,i}$ 는 각각 충격압력신호의 와도와 지속시간이다.  $P_{failure}(S_i, T_{duration,i})$ 는  $S_i$ ,  $T_{duration,i}$ 의 와도와 지속시간을 갖는 충격압력신호에서 파괴가 일어나기 위한 최소의 충격압력의 크기를 의미하며, 이는 동적 구조해석을 통해 계산한다. 손상지수를 고려한 화물창의 슬로싱 하중에 대한 강도를 평가의

예를 Fig. 2-2에 나타내었다. 그래프에서 ‘D=1’이 나타내는 선은 구조물이 파괴가 일어나는 압력의 피크치와 작용시간 (화물창의 구조해석을 통해 얻을 수 있는 값)을 의미하며, ‘D=D<sub>3hr</sub>’은 실험을 통해 측정한 재현기간 3시간 최대 손상지수를 의미한다. 아래 예시 결과에서 D<sub>3hr</sub>의 값이 1을 넘지 않는 것 통해 해당 화물창은 슬로싱 충격에 안전하다는 평가를 내릴 수 있다.

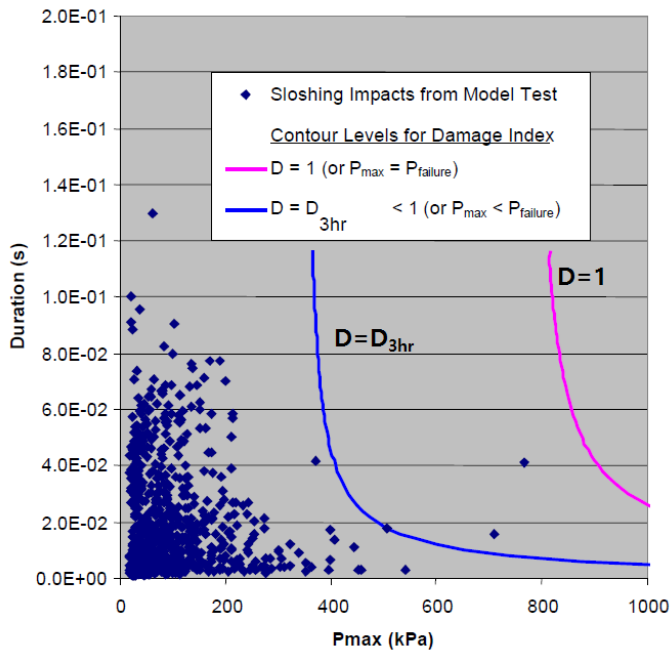


Fig. 2-2 Strength assessment based on damage index (ABS, 2014)

### 2.1.2 BV의 슬로싱 하중 예측 절차

BV의 슬로싱 하중 예측 절차를 나타낸 흐름도를 Fig. 2-3에

나타내었다. 앞서 살펴본 ABS의 슬로싱 하중 예측 절차와 유사하게 해석 조건의 선정, 운동해석수행, 슬로싱해석, 데이터의 통계해석, 슬로싱 하중 도출의 흐름을 따르지만 등가 단기 접근법이 아닌 장기 예측법을 바탕으로 장기 슬로싱 설계하중을 도출하는 것이 차이점이라 할 수 있다. 장기 예측법에서는 각 해상상태에 대한 슬로싱 하중의 확률분포 특성과 함께 슬로싱 충격의 발현빈도, 및 해상상태의 발현빈도를 결합하여 장기적인 관점에서 각 환경조건의 슬로싱 하중분포를 모든 조건에 대하여 계산, 이를 취합하여 장기 슬로싱 설계하중을 추정하게 된다. 극한의 해상상태에 기준한 등가 단기 접근법은 낮은 해상상태의 발생 빈도의 영향에 따른 가중치를 고려하지 않는다는 단점이 있다. 이와는 달리 선박이 겪게 될 모든 해상상태를 반영하여 낮은 해상상태와 높은 해상상태를 두루 해석에 포함하는 장기 예측법은 앞선 단기 예측법의 단점들을 보완할 수 있어 ABS를 제외한 대부분의 국제선급은 장기 예측법을 권고하는 추세이다. 그러나 장기 해석법의 경우 단기 예측법에 비하여 상대적으로 슬로싱 해석을 수행해야 할 조건이 많아지게 되어 실험을 수행함에 있어 현실적 어려움이 있다.

BV의 경우 슬로싱 모형실험조건의 선정에 대해서는 정확한 지침을 제안하고 있지 않지만, 각각의 환경조건에서 나타나는 슬로싱 하중의 확률분포의 불확실성에 대한 주의를 언급하고 있다. 같은 맥락에서 모형실험을 통한 설계하중 도출과 관련하여

신뢰구간의 계산을 통해 안전여유를 포함하여 설계하중을 예측해야 한다고 언급하고 있다.

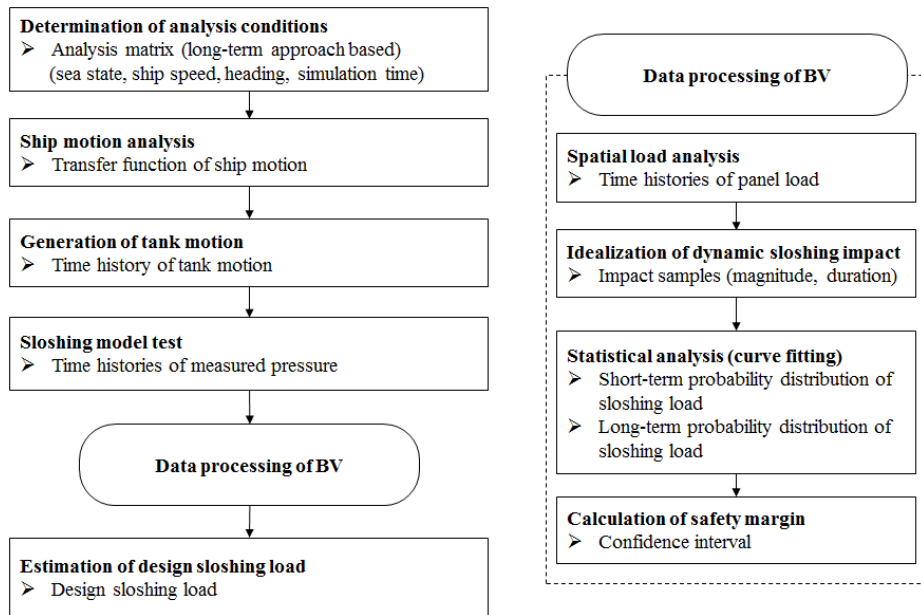


Fig. 2-3 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, BV

신뢰 구간은 부트스트랩 방법 (Bootstrap method)을 사용하여 계산된다 (Efron, 1979). 이 방법은 대체 샘플을 사용하여 기존의 표본을 바탕으로 부트스트랩 표본이라는 N세트의 추가적인 표본을 생성하는 방법이다. N세트의 부트스트랩 표본은 실험으로부터 획득한 기존의 표본과 동일한 크기를 갖도록 생성한다. 기존의 표본과 추가적으로 생성한 N세트의 부트스트랩 표본 각각에 대하여 통계해석을 수행하여 추가적인 확률분포 샘플을 얻을 수 있으며 이를 활용하여 각 해석조건의 슬로싱

하중 확률분포에 대한 신뢰구간을 얻을 수 있다 (Fig. 2-4).

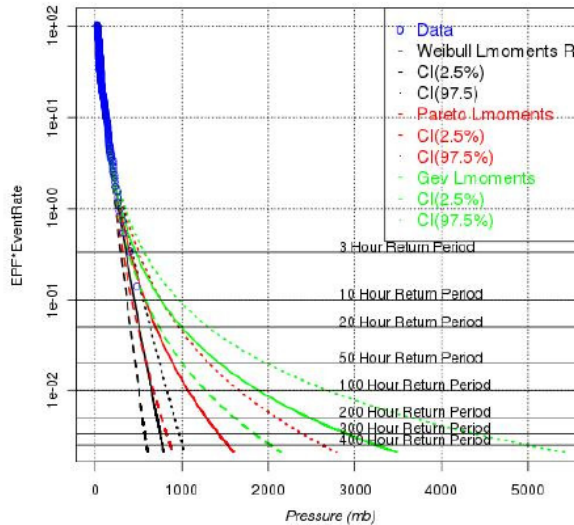


Fig. 2-4 Consideration of confidence intervals in the estimation of sloshing load (BV, 2011)

### 2.1.3 DNV-GL의 슬로싱 하중 예측 절차

DNV-GL의 LNG 화물창 및 선체 강도 평가를 위한 슬로싱 충격 하중의 예측 절차를 Fig. 2-5에 요약하여 나타내었다. DNV-GL의 또한 BV의 하중 예측 절차와 유사하게 장기 예측에 바탕을 권고하고 있으며, 이를 위해 많은 수의 환경조건에서 모형실험을 수행하여 각각의 환경조건에서의 슬로싱 하중 분포를 바탕으로 장기 슬로싱 하중 확률분포도를 도출하는 방법을 제안하고 있다. 기본적으로 DNV-GL에서 제안하는 환경조건의 범위는 파랑빈도분포도 (Wave scatter diagram)에 기준하여 선박이 설계

수명 동안 겪게 될 환경조건에 대하여 1초 간격의 파주기 ( $T_z$ )와 1m 간격의 유의파고 ( $H_s$ ), 15도 간격의 선수각에 대하여 모형실험을 수행할 것을 제안하고 있다. 이를 정리하면 각 적재 깊이 마다 1232개의 환경조건에 대하여 슬로싱 해석을 수행해야 한다 ( $T_z=5.5\sim 15.5\text{s}$ ,  $H_s=0.5\sim 15.5\text{m}$ , IACS34 wave scatter diagram 기준). 이 모든 조건에 대하여 슬로싱 모형실험을 수행하는 것은 현실적인 문제가 있으며 이를 개선하기 위해 DNV-GL는 제한된 횟수의 실험을 통해 신뢰도 높은 장기예측을 수행하는 방법에 대하여 아래와 같이 조언하고 있다.

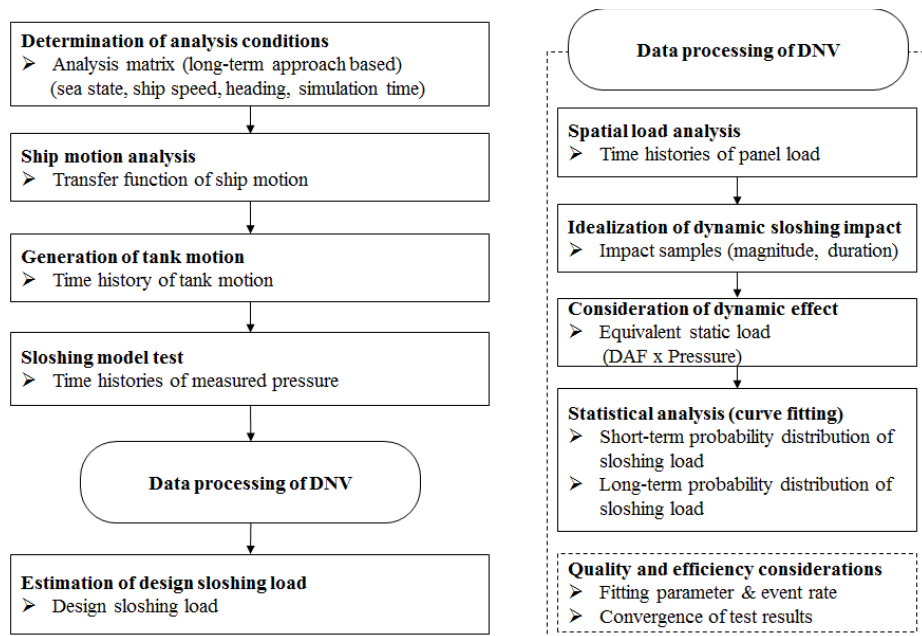


Fig. 2-5 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, DNV-GL



- 1) 각 적재깊이 별로 슬로싱 충격이 발생하는 파주기 및 파고 범위를 우선적으로 확인.
- 2) 해당조건에서 30분 내에 특정 임계 값을 넘는 슬로싱 압력이 계측되지 않는다면 더 이상 실험을 지속할 필요가 없음.
- 3) 장기 슬로싱 하중의 확률분포에 가장 큰 영향을 미치는 환경 조건을 실험을 진행하는 도중에 확인할 것을 권고.
- 4) 클러스터 패널로부터의 충격압력 데이터는 ‘maximum per event’ 방법을 활용하여 해석되어야 함. 실험 결과는 즉각적으로 분석하여 다음 모형실험 계획에 반영할 수 있도록 해야 함.
- 5) 실험조건을 선별하는 과정에서 다양한 지표를 활용할 수 있음. 예를 들어 단위시간당 발생하는 슬로싱 충격의 횟수는 압력 값에 비하여 비교적 짧은 시간 동안의 모형실험에도 수렴한 결과를 보임.
- 6) 모형실험을 수행하지 못한 조건에 대한 결과는 실험을 수행한 조건에 대한 결과를 바탕으로 선형 보간을 사용.
- 7) 설계와 관련된 하중 범위에서 상당한 확률 기여도를 갖는 경우, 실험 시간은 통계적 적합성이 실험 자료를 적절하게 표현하기에 충분히 길어야 함.
- 8) 슬로싱 충격 압력은 수렴성이 낮고 변동성이 크기 때문에 일부 실험결과는 해당 환경조건에 대한 슬로싱 하중

분포를 정확하게 나타내지 않을 수 있음. 실험결과 평가 시 경험 및 물리적 추론이 요구됨.

DNV-GL의 경우 모형실험을 통해 수집한 슬로싱 동적 하중 표본을 화물창의 구조적 특징을 고려한 등가의 정적 하중(equivalent static load)으로 치환하여 이를 바탕으로 통계해석을 수행한다. 등가의 정적 하중  $P_{static,i}$  은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_{static,i} = DAF(T_r / T_n) \times P_i \quad (2-2)$$

여기서  $DAF$  는 dynamic amplification factor의 약어로 이는 충격하중의 상승시간  $T_r$  과 화물창 구조물의 고유진동수  $T_n$  의 비율에 대한 함수로 나타난다. 보편적으로 슬로싱 하중의 동적 특성을 고려한 등가 정적 하중은 동적 특성을 고려하지 않은 경우에 비하여 큰 값을 가지게 된다 (Fig. 2-6).

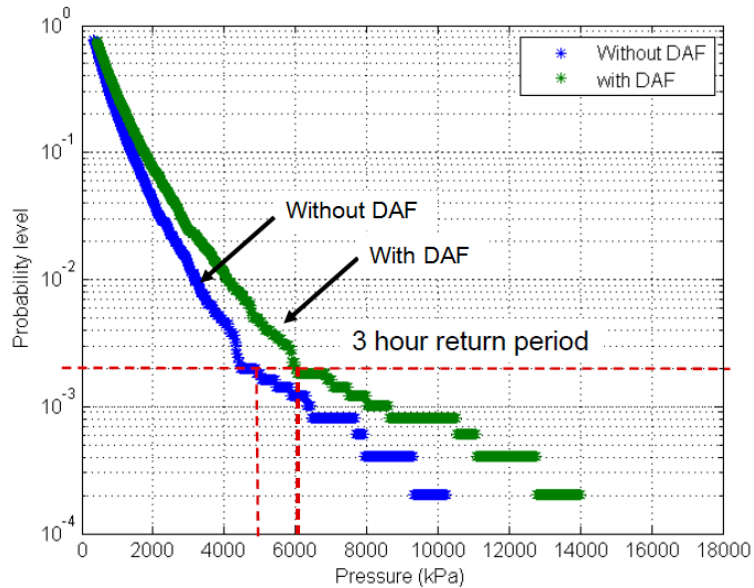


Fig. 2-6 Comparison of pressure distributions for static load and loads including dynamic amplification factor (DNV-GL 2016)

#### 2.1.4 LR의 슬로싱 하중 예측 절차

LR의 슬로싱 하중 예측 절차를 Fig. 2-7에 나타내었다. LR의 경우 적재조건에 따라 장기 예측법과 단기 예측법을 선택적으로 고려하는 방법을 구축하였고, 여타 국제선급들과 마찬가지로 슬로싱 해석을 위해 모형실험을 수행하는 것을 전제로 절차가 구축되어있다. 모형실험 이외에도 전산 유체 역학을 활용할 수 있음을 언급하고 있지만 이는 모형 실험을 수행할 해석조건의 범위를 설정하고 모형실험 결과를 검증하는 용도로 활용하거나 화물창 모형 내 압력계측 위치 결정 등의 용도로 활용할 것을 권고하고 있다.

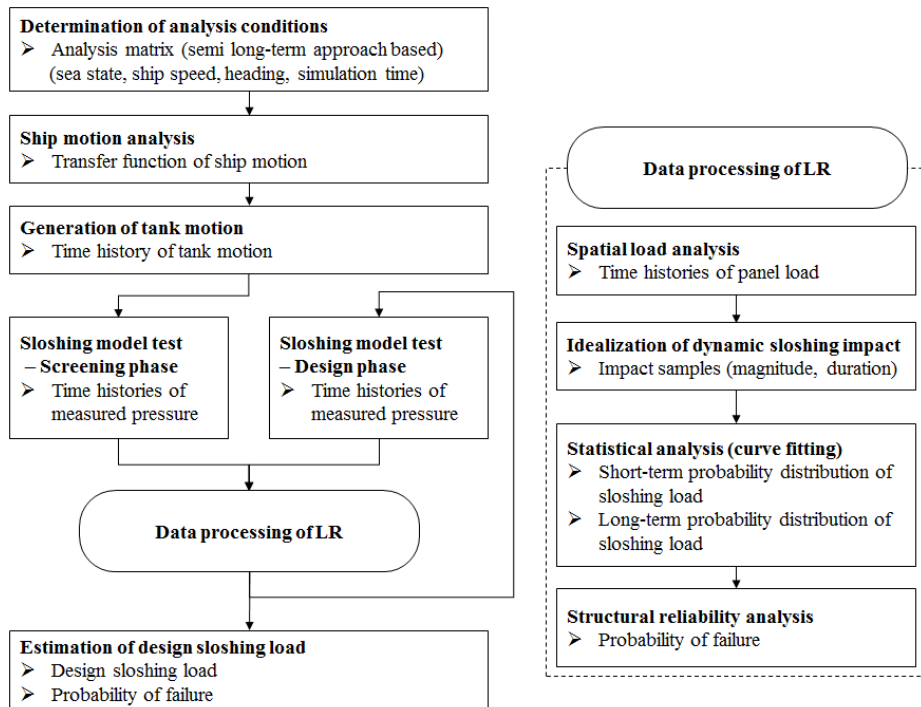


Fig. 2-7 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, LR

위의 흐름도에서도 나타나있지만 LR의 경우 적재조건에 따라 각기 다른 슬로싱 설계하중을 예측하는 방법을 적용하는 준-장기 예측의 형태를 띠고 있다. LR은 높은 적재조건인 경우 일반적으로 해상상태가 극심할수록 더 큰 슬로싱 하중이 발생되므로 설계파도조건에서의 모형실험을 통해 슬로싱 설계 하중을 예측할 수 있지만 낮은 적재조건인 경우 보다 완연한 해상상태에서도 설계 파도 조건보다 더 큰 슬로싱 하중이 나타날 수 있으므로 다양한 파고조건에서 실험을 수행하여 장기적인 결과를 살펴볼 것을 권고하고 있다. 이에 LR은 아래와 같이 슬로싱 모형실험을

수행하는 단계를 네가지로 구분하고 있다.

- 1) 초기 스크리닝 (screening) 단계: 압력센서를 모형 탱크 전반에 걸쳐 분포시킨 후 큰 슬로싱 하중을 발생시키는 해상상태, 선박속도, 선수각, 적재조건을 확인하는 단계이다. 또한 큰 압력이 발생하는 위치 또한 확인을 한다. 높은 적재조건과 낮은 적재조건 모두에 대하여 적용.
- 2) 초기 스크리닝 단계(파고의 영향): 슬로싱 하중에 있어 파고의 영향을 확인하는 단계로, 낮은 적재 조건의 경우에만 확인을 한다.
- 3) 추가 스크리닝 단계: 초기 스크리닝 단계에서 결정된 주요 환경조건에 대하여 추가적인 실험을 수행한다.
- 4) 설계 단계: 앞선 스크리닝 단계를 바탕으로 큰 슬로싱 하중이 나타난 조건에 대하여 장시간 실험데이터를 확보한다. 또한 큰 압력값이 나타난 위치에 집중적으로 압력센서를 배치하여 실험결과의 신뢰성을 높인다.

준-장기 예측의 절차를 따르는 LR의 경우 슬로싱 설계하중의 추정을 위한 통계 해석법에서도 여타 기관과 차이를 보인다. 높은 적재깊이조건 경우 극한의 해상상태에서 실험을 수행, 해당 해상상태에서 재현기간 3시간에 해당하는 최대 슬로싱 하중값을 설계수명에서 화물창이 겪게될 최대 슬로싱 하중으로 추정한다. 재현기간 3시간 최대 슬로싱 하중값 자체의 수렴성을 높이기

위하여 임계 환경조건에서 충분한 횡수의 반복 실험을 권고하고 있지만 구체적인 횡수는 제시하고 있지 않다. (Kuo et al., 2009; Kim et al., 2014)

LR의 슬로싱 하중 예측 및 해석과 관련한 주요 특징 중 하나는 구조적 신뢰성 분석법(Structural Reliability Analysis)을 제안한다는 것이다. 구조적 신뢰성 분석법은 화물창의 파괴가능성을 통계적으로 추정하는 것이다(LR 2009; Gervaise et al., 2009). 간단히 말해서, 슬로싱 충격 하중과 화물창의 구조적 강도의 확률 분포를 유도하고 이를 비교하는 것이다. 하중 곡선과 구조강도 곡선 아래에 있는 영역은 화물창 시스템 파괴가 일어날 수 있는 구간이며, 이 구간의 크기는 해당 시스템의 파괴확률과 깊은 관련이 있다. 구조적 신뢰성 분석법의 예를 아래의 그래프에 나타내었다. Fig. 2-8의 그래프는 두 가지 케이스의 슬로싱 하중 분포 곡선과 하나의 화물창 구조 강도 곡선을 나타내고 있다. 사례 1의 경우, 하중 곡선과 강도 곡선 사이에 큰 겹침 영역이 있어 실패 가능성이 높음을 알 수 있다. 사례 2의 경우, 하중 곡선과 강도 곡선 사이에 겹침이 거의 없으므로 고장 확률은 매우 작다. 따라서 사례 2는 사례 1보다 훨씬 안전하다고 할 수 있다.

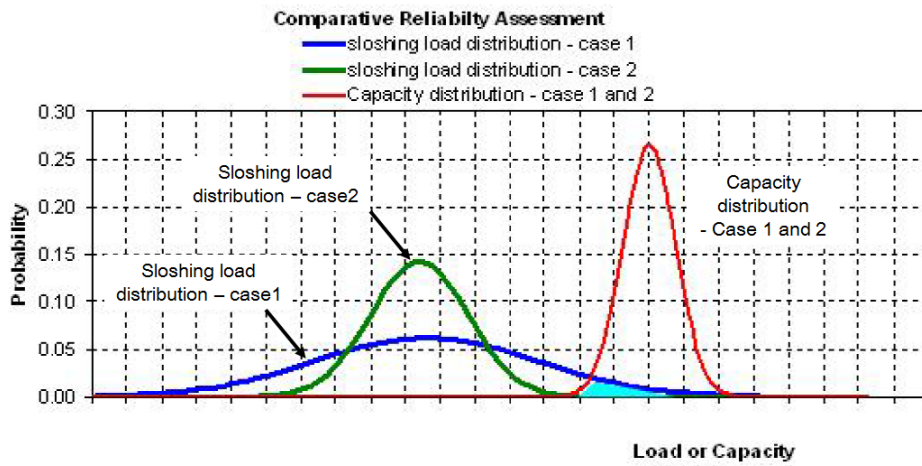


Fig. 2-8 Assessment using structural reliability analysis of LR (LR 2009)

## 2.2 국내 조선소의 해석절차

아래에 국내 조선소의 슬로싱 하중 예측 절차를 요약하여 정리하였다. 해당 내용은 2016년 총 3회에 걸쳐 이루어진 “한국형 통합 슬로싱 프로시저 개발을 위한 실무자 회의”의 토의 내용 및 회의에서 제공된 발표자료를 바탕으로 작성하였다.

### 2.2.1 대우조선해양의 슬로싱 하중 예측 절차

대우조선해양의 슬로싱 하중 예측 절차를 나타낸 흐름도를 Fig. 2-9의 그림에 나타내었다. 대우조선해양의 경우 장기 예측을 통한 슬로싱 하중 예측 절차를 구축하고 있다. 장기 예측법을 기본적인 절차로 사용함에 따라 슬로싱 해석을 수행해야 할 조건이 매우 많으며, 한정된 시간/비용적 여유를 바탕으로 가능한 신뢰도 높은 하중 예측을 위해 모형실험의 단계를 스크리닝 단계와 디자인 단계의 두 가지 단계로 구분하여 해석을 수행하고 있다.

- 1) 스크리닝 단계: 대상 선박이 겪게 될 환경조건 전반에 걸쳐 슬로싱 모형실험을 수행하는 단계. 하나의 환경조건에 대하여 실선기준 3시간에 해당하는 모형실험을 2회 반복하고, 해당 데이터에 대한 분석을 바탕으로 장기 슬로싱 하중분포에 기여도가 높은 환경조건을 분석.



2) 설계 단계: 스크리닝 단계에서 결정된 주요 환경조건에 대하여 추가적인 실험을 수행한다. 설계 단계에서는 실선기준 3시간에 해당하는 모형실험을 추가적으로 8회 반복하여 주요 환경조건에 대하여 실선기준 30시간에 해당하는 실험데이터를 바탕으로 슬로싱 하중을 추정.

대우조선해양의 경우도 DNV-GL와 동일하게 모형실험을 통해 수집한 동적 슬로싱 충격 하중을  $DAF$ 를 사용하여 등가의 정적 하중으로 치환한 후 Weibull 분포함수에 근사, 이를 바탕으로 장기 슬로싱 하중 분포를 추정하는 절차를 구축하고 있다.

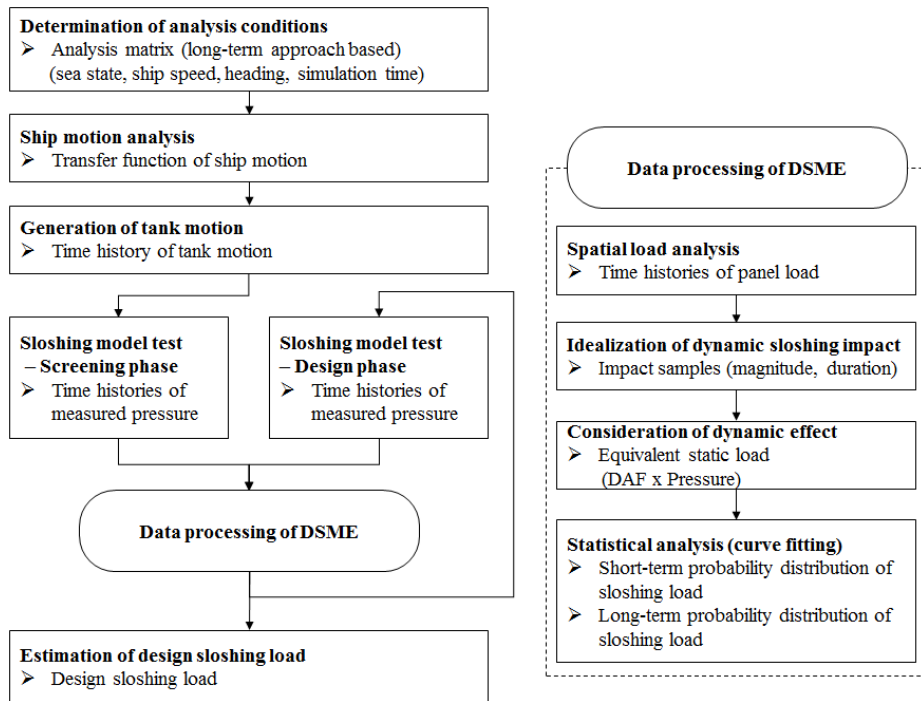


Fig. 2-9 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, DSME

### 2.2.2 삼성중공업의 슬로싱 하중 예측 절차

삼성중공업의 슬로싱 하중 예측 절차를 나타낸 흐름도를 Fig. 2-10에 나타내었다. 삼성중공업의 경우 대상 선박에 따라 각기 다른 슬로싱 하중 예측법을 사용한다. 우선 LNG 화물선의 경우 고전적인 단기 예측법을 적용하여 북대서양 파도에 기준하여 극한의 해상상태에서 실험을 수행, 해당 해상상태에서 재현기간 3시간에 해당하는 최대 슬로싱 하중값을 설계수명에서 화물창이 겪게 될 최대 슬로싱 하중으로 추정한다. 반면 FLNG의 경우도 단기 예측법을 적용하고 있으나 설치 해역의 정보를 분석하여 극한의 조건 뿐 아니라, 다소 완만한 해상 조건 및 운용조건에 따라 적합한 해상 조건을 추가로 고려하는 것으로 알려져 있다. 또한 삼성 중공업은 장기 슬로싱 하중을 추정하는 절차를 구축 및 검토를 완료하였고, 현재 실선 적용을 위한 준비단계에 있다.

삼성중공업 또한 한정된 시간/비용적 여유를 바탕으로 가능한 신뢰도 높은 하중 예측을 위해 모형실험의 단계를 스크리닝 단계와 개선된 스크리닝 단계, 디자인 단계의 세 가지 단계로 구분하여 해석을 수행하고 있다.

- 1) 스크리닝 단계: 대상 선박이 겪게 될 환경조건 전반에 걸쳐 슬로싱 모형실험을 수행하는 단계. 하나의 환경조건에 대하여 실선기준 5시간에 해당하는 모형실험을 1회 수행하고, 해당 데이터에 대한 분석을 바탕으로

슬로싱 압력이 높게 나타나는 조건을 선택.

- 2) 개선된 스크리닝 단계: 1차적인 스크리닝 단계 실험 결과를 바탕으로 1차 스크리닝 단계에서 실험을 수행하지 않았지만 추가적인 확인이 필요하다고 간주되는 환경 조건에 대하여 실선기준 5시간에 해당하는 모형실험을 1회 반복하고, 해당 데이터에 대한 분석을 바탕으로 슬로싱 압력이 높게 나타나는 조건을 선택.
- 3) 설계 단계: 스크리닝 단계에서 결정된 주요 환경조건에 대하여 추가적인 실험을 수행한다. 설계 단계에서는 실선기준 5시간에 해당하는 모형실험을 추가적으로 2회 이상 반복하여 주요 환경조건에 대하여 실선기준 15시간 이상에 해당하는 실험데이터를 바탕으로 슬로싱 하중을 추정.

삼성중공업의 경우 스크리닝 단계에서 모형실험을 수행할 조건을 선정하기 위한 별도의 절차를 구축하고 있다. 파랑빈도분포도로부터 선정함에 있어서 슬로싱 공진주기와 선박 운동 고유주기를 바탕으로한 고유의 스크리닝 절차를 구축하고 있다. 또한 파랑빈도분포도의 그룹화를 위해 서울대학교에서 개발한 슬로싱 위험도 분석 프로그램인 PRESLO를 활용한다고 알려져 있다 (Gou et al., 2011; Zheng et al., 2013). PRESLO의 경우 현재 개발 초기단계로 실험결과에 비하여 장파조건에서 큰 슬로싱 위험도를 나타내는 것이 확인되어 추가 검증 및 프로그램

수정 과정에 있다.

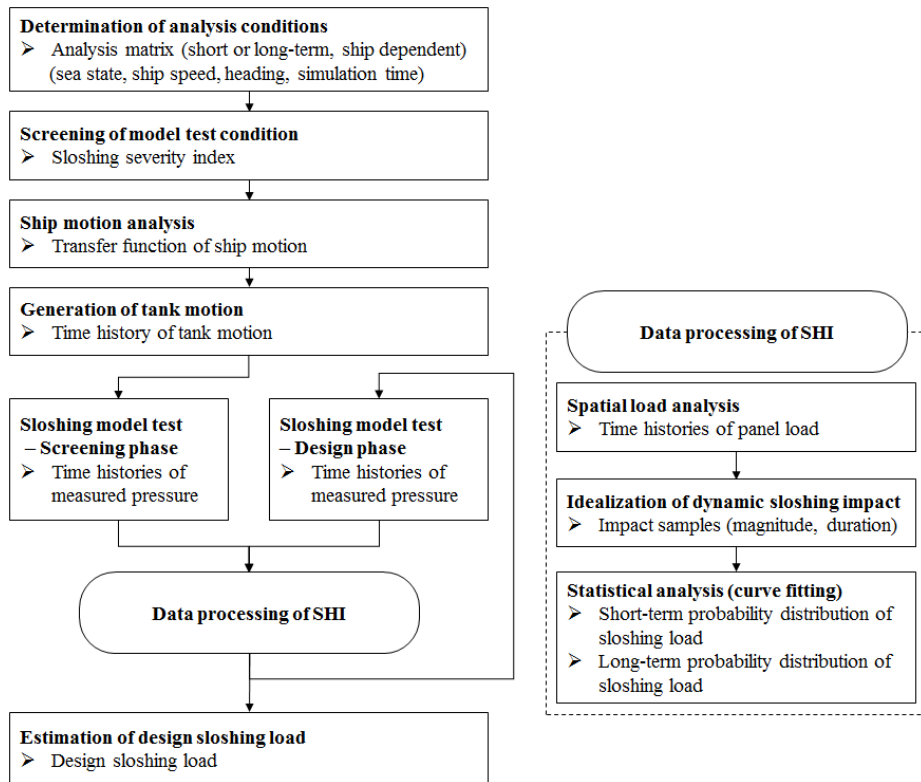


Fig. 2-10 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, SHI

### 2.2.3 현대중공업의 슬로싱 하중 예측 절차

현대중공업의 슬로싱 하중 예측 절차를 나타낸 흐름도를 Fig. 2-11에 나타내었다. 현대중공업의 경우 앞서 살펴본 대우조선해양과 삼성중공업과는 달리 단기 예측법에 근거한 하중 예측 절차를 구축하고 있다. 현대중공업의 경우 모형실험의 단계를 스크리닝 단계와 디자인 단계의 두 가지 단계로 구분하여

해석을 수행하고 있다.

- 1) 스크리닝 단계: 대상 선박이 겪게 될 환경조건 전반에 걸쳐 슬로싱 모형실험을 수행하는 단계. 하나의 환경조건에 대하여 실선기준 5시간에 해당하는 모형실험을 1회 반복하고, 해당 데이터에 대한 분석을 바탕으로 장기 슬로싱 하중분포에 기여도가 높은 환경조건을 분석.
- 2) 설계 단계: 스크리닝 단계에서 결정된 주요 환경조건에 대하여 추가적인 실험을 수행한다. 명확한 기준에 대해서는 알려져 있지 않음.

현대중공업의 경우 화물창의 슬로싱 공진주기를 활용한 고유의 절차를 활용하여 스크리닝 단계에서 모형실험을 수행할 조건을 선정한다.

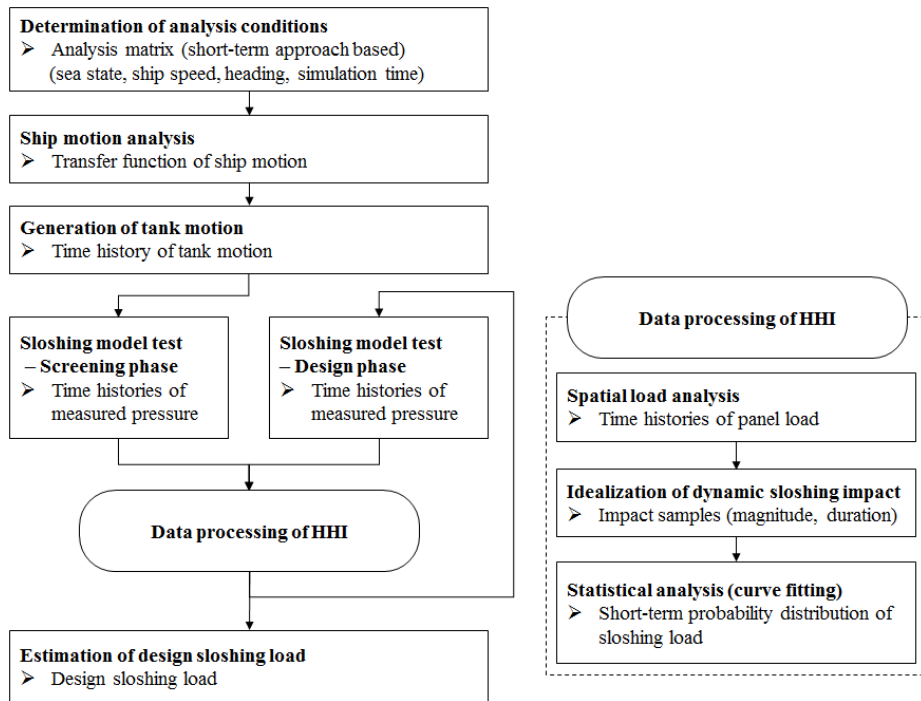


Fig. 2-11 Flowchart for evaluation of design sloshing loads, HHI

## 2.3 주요 핵심 기술 및 문제점 분석

앞서 살펴본 국제 선급 및 국내 조선소의 슬로싱 하중 예측 절차를 바탕으로 슬로싱 하중의 장기 예측을 위한 주요 핵심 기술 및 현재의 문제점을 살펴보고자 한다.

### 2.3.1 모형 실험 조건 스크리닝

슬로싱 하중의 장기 예측에 있어 핵심 사안 중 하나는 모형실험 조건의 선정, 즉 실험 계획표를 작성하는 것이라 할 수 있다. 장기 예측법의 특성상 모형실험을 수행해야 하는 조건이 많을 수 밖에 없으며 한정된 시간 및 비용을 바탕으로 신뢰도 높은 슬로싱 하중 추정을 위해서는 실험을 수행할 조건을 선정하는 것이 매우 중요하다.

각 기관의 슬로싱 모형실험 조건을 선정하는 방법을 요약하여 Table 2-1에 나타내었다. 가장 많은 기관에서 사용하는 방법은 실험의 단계를 세분화 하는 방법이다. 이 방법은 1차적으로 넓은 범위의 환경조건에 대하여 스크리닝 실험을 수행한 후, 그 실험결과를 바탕으로 추가적으로 모형실험을 수행할 조건을 선정하는 방안으로 실험의 효율성을 높일 수 있는 방안으로 보인다. 다만 각 기관의 단계 세분화 및 1차 스크리닝 실험조건의 선정방법이 차이가 있어 실험결과에 대한 일관된 합의를 얻기 힘들다는 것이 문제라 할 수 있다.



모형실험 조건 선정 시 각 기관에서 공통적으로 고려하는 요인은 탱크의 슬로싱 공진주기이며, 공진주기에 가까운 탱크 운동을 유발하는 환경조건에 대하여 중점적으로 모형실험을 수행하는 것을 기본으로 하고 있다. 일부 기관의 경우 1차 스크리닝 실험조건 선정을 위하여 수치해석을 통해 각 조건에서 나타날 슬로싱의 정도를 사전에 확인하고 있다. 국내 조선소의 경우 전체 실험조건의 축소를 위해 각 환경조건의 그룹화 방법을 사용하고 있는 반면 국제 선급의 경우 환경조건의 그룹화를 내부 절차로 구축하고 있지 않아, 국제 선급과 조선소 간의 절차가 간합의가 이루어 지지 않는다는 것 또한 주요 문제점 중 하나라 할 수 있다.

Table 2-2 Screening methods for selecting model test condition

Screening method	Institution
Prescreening based on numerical analysis	BV, LR, SHI
Grouping of wave scatter data	DSME, SHI
Categorize the phase of model test	LR, DNV-GL, DSME, SHI
Interpolation of the results for not tested case	DNV-GL

### 2.3.2 각 기관의 모형실험 및 하중예측 절차의 통일성 부재

전반적인 흐름은 큰 차이가 없지만 실험조건 선정의 기준, 실험의 준비등과 같이 후 처리를 통해 수정할 수 없는 사안들에 대하여 각 기관이 차이를 보인다. 대표적인 사항들을 정리하여 아래의 Table 2-4~Table 2-6에 나타내었다.

우선 각 기관이 모형 실험을 수행하길 권고하는 적재깊이 조건이 차이를 보인다. 정확한 적재깊이 조건을 명시하고 있는 기관이 있는 반면 주요 적재 깊이의 범위만을 제시하는 경우도 있었다. 운항하는 환경조건 또한 차이를 보인다. DNV-GL은 15도 간격의 선수각 조건마다 파랑빈도분포도 기준 1초의 특성과 주기 ( $T_z$ ) 간격, 1미터의 유의파고 ( $H_s$ ) 간격의 모든 파랑 데이터에 대하여 슬로싱 해석을 수행할 것을 권고하고 있다. 이는 DNV-GL에서 제시하는 효율적인 모형실험을 위한 실험결과 스크리닝 절차를 감안한다 하더라도 상당히 많은 수의 모형실험을 요구하는 것으로, 현실적으로 해당 절차를 그대로 따르기에 어려움이 있다. LR의 경우 2초의  $T_z$  간격에 대하여 모형실험을 수행할 것을 권고하고 있으며  $H_s$ 와 선수각에 대한 기준은 나타나 있지 않다. 국내 조선소의 경우에도 해역조건과 관련한 공통된 기준은 없었으며 각기 다른 방법으로 파랑 빈도 분포도를 그룹화하여 실험 조건을 선정하는 것으로 나타났다.

하나의 조건당 모형실험을 수행하는 시간에서도 차이를 보였다. 다수의 선급들과 조선소는 각 조건당 실선기준 5시간

실험을 1회 수행하는 것을 최소 기준으로 삼고 있으나, 대우조선해양의 경우 실선기준 3시간 실험을 2회 수행하는 것을 최소기준으로 삼고 있다. 또한 일부 선급은 최소 실험시간에 대한 기준을 제시하지 않고 있어 어떤 기준에 따라 슬로싱 모형실험을 수행해야 하는지가 불분명하다는 점이 문제점이라 할 수 있다.

Table 2-3 Difference in standards for experiment conditions proposed by each institution, filling depth condition

	Recommendation of filling depth condition
ABS	LNGC: 0.10L, 0.70H, 0.80H, 0.90H, 0.95H, FLNG: 0.25H, 0.30H, 0.40H, 0.50H, 0.60H
BV	LNGC: 0.00H~0.10H, 0.70H~0.98H FLNG: 0.15H, 0.20H, 0.25H, 0.30H, 0.40H, 0.50H, 0.60H
DNV-GL	-
LR	LNGC: 0.10H, 0.70H, 0.80H, 0.95H FLNG: 0.15H, 0.20H, 0.30H, 0.50H
DSME	LNGC: 0.10H, 0.70H, 0.80H, and 0.95H FLNG: 0.10H, 0.20H, 0.30H, 0.40H, 0.50H, 0.60H, 0.70H, 0.80H, 0.95H
HHI	LNGC: 0.1H, 0.70H, 0.8H, 0.95H FLNG: 2~3 fillings in 0.2H~0.6H
SHI	LNGC: 0.10H, 0.70H ~ 0.95H FLNG: 0.15H ~ 0.60H

Table 2-4 Difference in standards for experiment conditions proposed by each institution, sea state condition

	Recommendation of sea state condition
ABS	-
BV	-
DNV-GL	Discretization: 1s for Tz, 1m for Hs, 15deg for heading
LR	Discretization: 2s for Tz
DSME	-
HHI	Discretization: 1~2s for Tz near sloshing resonance period
SHI	Discretization: 1~1.5s / 0.5s for Tz (screening/refinement)

Table 2-5 Simulation time recommended by each institution (full scale)

	Recommendation of test time
ABS	At least 5 hour x 1 repeat (5hour x 6 repeat for critical case)
BV	-
DNV-GL	-
LR	At least 5 hour x 1 repeat
DSME	At least 3 hour x 2 repeat (3hour x 10 repeat for critical case)
HHI	At least 5 hour x 1 repeat
SHI	At least 5 hour x 1 repeat (5 hour x 3 repeat for critical case)

모형 실험 시 사용하는 압력센서의 배치와 관련한 기준 또한 각 선급마다 차이를 보였다. ABS와 DNV-GL의 경우 실선 기준 1.0m x 1.0m 영역에 16개의 압력센서를 설치할 것을 권고하고 있으며, 동일 영역에 BV는 4개, LR은 9개의 압력센서를 설치할

것을 요구하고 있다. 반면 국내 조선소의 경우 공통적으로 1.5m x 1.5m 영역에 9개의 압력센서를 설치하여 모형실험을 수행하는 것을 기준으로 삼고 있다. 이처럼 해석을 수행하는 조선소와 이에 대한 승인을 내리는 선급 사이에 하중 예측 절차에 차이가 존재한다는 것 또한 주요 문제점으로 볼 수 있다.

Table 2-6 Recommended panel size (full scale)

	Recommendation of sensor size
ABS	16 sensors in 1.0m x 1.0m
BV	4 sensors in 1.0m x 1.0m
DNV-GL	16 sensors in 1.0m x 1.0m
LR	9 sensors in 1.5m x 1.5m
DSME	9 sensors in 1.5m x 1.5m
HHI	9 sensors in 1.5m x 1.5m
SHI	9 sensors in 1.5m x 1.5m

### 2.3.3 슬로싱 모형실험 결과의 수렴성

각 환경조건에서 발생하는 슬로싱 하중에 대한 모형 실험 결과의 수렴성은 장기 슬로싱 하중분포에 있어 큰 영향을 미친다. 국제선급의 경우 장기 슬로싱 하중 예측에 높은 기여도를 보이는 일부 조건들에 대하여 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있도록 장시간 모형실험을 수행해야 한다고 언급하고 있지만 그 명확한 기준이 제시되어 있지 않으며 (LR 2009), 기존의 많은 연구들을

통해 각 선급에서 제시하고 있는 모형실험 수행의 최소 권장 시간은 수렴성이 상당히 떨어진다는 것이 알려져 있다 (Kuo et al., 2009; Fillon et al., 2011; Ahn et al.; 2013, Kim et al., 2014).

실험결과의 수렴성을 개선시킬 수 있는 방법과 관련하여 각 기관이 취하고 있는 방안을 정리하여 Table 2-7에 정리하였다. BV의 경우 실험 결과 분석 시 신뢰구간 계산을 통해 안전여유를 감안할 것을 권고하고 있다. 신뢰구간 계산을 통해 안전여유를 고려하는 것은 실험결과의 불확실성을 설계단계에서 고려할 수 있는 방법이 될 수는 있지만 불확실성 자체를 개선할 수 있는 방안은 아니라는 점에서 여전히 한계점이 있다. DNV-GL의 경우 압력값에 비하여 비교적 수렴성이 높은 시간당 슬로싱 충격 발현횟수를 활용한 Weibull 분포함수의 모수를 추정 가능성을 언급하고 있지만 정확한 방법이나 적용 예시를 제안하고 있지 않아 향후 충분한 검증이 필요할 것으로 보인다. 결국 슬로싱 하중의 수렴성을 높일 수 있는 방안의 경우 모형실험수행시간의 증가 이외의 뚜렷한 대안이 제시된 바가 없다고 할 수 있다.

Table 2-7 Methods to improve convergence of model test results

Method	Institution
Long-time simulation for critical cases	BV, DNV-GL, LR, DSME, SHI
Consider confidence interval of pressure distribution	BV
Use alternative parameter for extreme function fitting	DNV-GL

### 3. 슬로싱 하중 장기 예측 절차 개발

#### 3.1 장기 예측 절차 개요

본 연구에서는 슬로싱 하중 장기 예측을 절차를 개발한다. 본 절차 개발의 목적은 모형실험을 통한 슬로싱 하중 장기 예측에 있어 슬로싱 해석조건 선정, 모형실험 수행, 실험결과의 해석 등의 주요 사안과 관련하여 국내조선소 및 국제선급이 공통적으로 합의할 수 있는 수준의 절차 구축을 목표로 한다. 이를 위해 서울대학교가 주관하여 “한국형 통합 슬로싱 프로시저 개발을 위한 실무자 회의”를 추진하였으며, 2016년 9월부터 12월 사이에 총 3회에 걸쳐 이루어진 회의를 통해 슬로싱 장기 하중 예측 절차에 관한 초안을 구축하였고, 향후 지속적으로 절차를 보완할 계획이다. 회의 참여기관은 서울대학교, 대우조선해양, 삼성중공업, 현대중공업, 한국선급, 한국산업기술평가관리원의 6개 기관이며, 국내 대학 및 국제 선급의 참여를 독려할 계획이다.

본 논문에서 제안하는 슬로싱 하중 장기 예측 절차의 흐름도를 Fig. 3-1에 나타내었다. 앞서 소개한 국제 선급 및 국내 조선소의 흐름도와 크게 다르지 않으며 기존의 각 기관의 절차의 장점들을 수용함과 동시에 기존의 절차들이 지닌 문제점을 보완할 수 있는 방안으로 절차를 구축하였으며, 각 항목의 내용을 아래의 장에서 세부적으로 다루기로 하겠다.

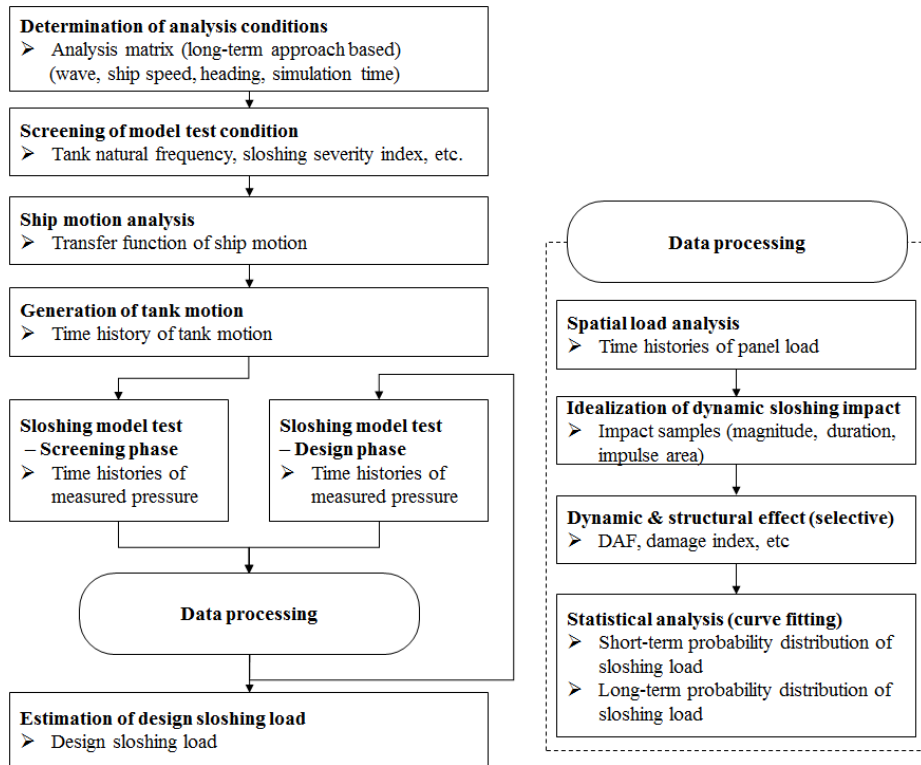


Fig. 3-1 Proposed flowchart for evaluation of design sloshing loads



## 3.2 선박의 운동 해석 및 슬로싱 모형 실험 조건의 선정

### 3.2.1 선박 내 화물창 및 적재 조건 선정

우선 슬로싱 해석을 수행할 화물창을 선정해야 한다. 특별한 목적이 있는 경우가 아니라면 선박에 배치된 화물창들 중에서 가장 큰 슬로싱이 발생할 것으로 예상되는 화물창에 대하여 해석을 수행하는 것이 바람직할 것이다. 일반적인 멤브레인형(membrane type) LNG 운반선의 화물창들의 경우 선수에서 가장 가까운 1번 화물 창을 제외하고는 유사한 구조 및 크기를 가진다. 따라서 1번을 제외하고 운동진폭이 가장 클 것으로 예상되는 탱크를 선정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 배의 무게중심에서 가장 멀리 떨어진 화물창이 가장 높은 운동 응답을 보이므로, 이를 바탕으로 해석을 수행할 화물창을 선정하면 된다. 선수부에 위치한 1번 화물창은 크기는 작지만 선박 운동중심으로부터 거리가 멀어 운동이 크고 비대칭적 형상으로 인해 탱크 운동시 유량이 집중되어 큰 슬로싱이 발생할 가능성이 있으므로, 탱크 선정에 있어 주의가 필요하다 (LR, 2009).

슬로싱 해석을 수행할 적재조건은 대상 선박의 특성에 따라 유동적으로 고려해야 한다. 일반적인 멤브레인 형 LNG 운반선의 경우 적재조건 제한이 있어 탱크 높이의 15%이하 또는 70% 이상의 적재조건에서만 운항이 가능하다. 따라서 슬로싱 해석

또한 허용된 적재조건에서 수행을 것이 바람직하다. 본 논문에서 제안하는 LNG 운반선에 대한 슬로싱 해석조건은 탱크 높이 (H)의 10%, 70%, 80% 및 95%이다. 적재조건이 없는 LNG-Shuttle, LNG Regasification Vessels (LNG-SRV), Floating LNG 등의 경우 더욱 다양한 적재조건을 고려해야 하며, 기본적으로 탱크높이의 10%, 20%, 30%, 50%, 70%, 80%, 95%의 조건에서 해석을 수행할 것을 제안한다. 상기 적재조건은 고정적인 것이 아니며, 탱크가 운용되는 장소 또는 탱크의 크기 및 형상에 따라 유동적인 수정이 필요하다.

Table 3-1 Consideration of cargo tank and filling depth condition

	Description
Cargo tank	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No.2 tank for conventional LNGC</li> <li>• Consideration of tank size &amp; location</li> <li>• If possible, simple numerical study is recommended</li> </ul>
Filling depth	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LNGC: 0.10H, 0.70H, 0.80H, 0.95H</li> <li>• FLNG: 0.10H, 0.20H, 0.30H, 0.50H, 0.70H, 0.80H, 0.95H</li> </ul>

### 3.2.2 해양파 조건의 선정

해양파 조건은 대상 선박이 운항할 해역에 따라 유동적으로 선정해야 한다. LNG운반선의 경우 비교적 파고가 높은 북대서양 교역로의 파도 조건이 통상적으로 사용되며, IACS - No 34 표준

파도 데이터에 각 해양조건이 발생할 확률에 대한 데이터가 잘 정의되어 있다. 반면 특정위치에 고정되어 업무를 수행하는 FLNG등의 경우 대상 해역의 해양데이터를 바탕으로 해석을 수행할 해상상태를 선정해야 한다. 장기 예측의 경우 기본적으로 선박이 운항 수명 동안 겪게 될 모든 환경에서의 슬로싱 하중 정보를 필요로 하므로 파도 분포도의 전반적인 조건을 포괄하도록 해석조건을 선정해야 한다. 파도 분포도에서  $H_s$ 는 3m 간격,  $T_z$ 는 이론상 공진주기의 약 30% 내외의 범위에서 2초 간격으로 살펴볼 것을 제안한다. 기본적으로 보수적인 결과를 주는 장파정해양파 조건을 활용하여 파도의 시계열을 생성하며, 대상해역의 환경 정보에 따라  $\cos^n \theta$ 의 확산을 적용한 단파정해양파 조건을 고려할 수도 있다.

Table 3-2 Consideration of wave condition (screening phase)

	Description
Wave data	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standard: IACS No.34 data</li> <li>• Site specific wave data</li> </ul>
Wave period	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discretization with 2sec interval for <math>T_z</math></li> </ul>
Wave height	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discretization with 3m interval for <math>H_s</math></li> </ul>
Wave heading	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimum 30deg interval from 90deg to 180deg</li> </ul>
Spreading function	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basically long-crested wave assumption</li> <li>• For specific ocean, consider short-crested wave with <math>\cos^n \theta</math> spreading</li> </ul>

### 3.2.3 선속 조건의 선정

선속의 경우 선수각과 파고에 따라 유동적으로 고려해야 하며, 실제 운항 방침을 고려할 때 횡파 조건에 가깝고 파고가 높을수록 느린 선속을 고려하는 것이 바람직하다. 아래의 Table 3-3에 선수각과 유의파고에 따른 선속의 고려방침을 정리하였다.

Table 3-3 Determination of ship speed

Wave height	$0^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$	$45^{\circ} < \theta < 135^{\circ}$
$H_S < 5\text{m}$	V <sub>design</sub>	V <sub>design</sub>
$H_S > 5\text{m}$	V <sub>design</sub>	2/3V <sub>design</sub>
Wave height	$135^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$	
$H_S < 4\text{m}$	V <sub>design</sub>	
$4\text{ m} < H_S < 7\text{ m}$	2/3V <sub>design</sub>	
$H_S > 9\text{m}$	1/2V <sub>design</sub>	

### 3.2.4 모형 실험 테이블의 작성

본 논문에서는 2단계로 구분된 모형실험을 수행하는 것을 권고한다. 1단계는 스크리닝 단계로 해석을 수행하기로 선정된 모든 조건에 대하여 동일한 시간 동안 모형 실험을 수행하는 것이다. 각 조건마다 실선기준 5시간의 모형실험을 1회 수행할 것을 권고한다. 2단계는 1단계에서 수행한 모형실험 결과를 바탕으로 장기 슬로싱 하중 예측을 한 뒤, 각 조건이 장기 슬로싱

하중값에 미치는 기여도를 바탕으로 큰 기여도를 보이는 일부 조건에 대하여 추가실험을 하는 단계이다. 이때 파도의 시계열은 임의의 파워상각을 이용하여 생성해야 하며 본 논문에서는 스크리닝 단계와 동일하게 실선 기준 5시간에 해당하는 모형 실험을 2회 이상 수행할 것을 제안한다. 따라서 주요 해양조건의 경우 스크리닝 단계의 결과를 포함하여 총 15시간에 해당하는 모형실험을 수행한 것으로 간주할 수 있다.

Table 3-4 Simulation time of each test condition

	Description
Test duration (minimum)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Screening phase : 5hour x 1 repeat</li> <li>• Design phase: 5hour x 2 additional repeat</li> </ul>

### 3.2.5 운동 해석

주어진 해양조건에서의 선박의 운동을 예측하기 위해서는 선박의 운동전달함수 (motion transfer function)가 필요하다. 이를 위해서 신뢰할 수 있는 선박 운동 계산 프로그램을 사용해야 한다. 운동 계산 프로그램은 3 차원 패널 회절 및 복사 포텐셜 이론을 기반으로 한 것이어야 하며, 선형 전달 함수는 주파수 도메인 또는 시간 도메인 내에서 생성된다. 현재까지 알려진 선박 운동 계산에 적절한 프로그램은 다음과 같다: HydroStar, KR3D, WAMIT, WADAM, WASIM, 및 WISH. 일반적으로 탱크 내 슬로싱 현상은 선박의 운동, 특히 횡동요 운동의 크기를 감소시키는

효과가 있으므로(Kim et al., 2005) 보수적인 해석을 위해 선박의 운동 계산시 탱크 내 슬로싱 연성효과를 고려하지 않아도 된다.

Table 3-5 Seakeeping analysis for sloshing model test

	Description
Analysis method	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seakeeping analysis based on potential theory</li> <li>• Linear transfer functions are generated within the frequency domain or time domain</li> <li>• Coupling of the vessel motion and sloshing is recommended but it is not necessary</li> </ul>
Appropriate softwares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HydroStar, KR3D, WAMIT, WADAM, WASIM and WISH, etc.</li> </ul>

### 3.2.6 탱크 운동 시계열 생성

선박의 운동계산을 통해 생성된 RAO를 해석조건의 파도 스펙트럼과 결합하여 해석조건에서의 선박의 운동 시계열을 생성한다. 생성된 운동 시계열이 주기성을 갖지 않도록 하기 위하여 운동 시계열 생성시 200개 이상의 유닛으로 불균등하게 이산화한 파도 스펙트럼을 사용할 것을 권고한다. 모형실험에 사용하기 위하여 운동 진폭과 시간 스케일은 Froude 스케일링에 따라 축척하여 사용한다.

Table 3-6 Generation of time history of tank motion

	Description
Wave component	More than 200 components, with non-uniform discretization
Scaling	Froude scaling

### 3.3 슬로싱 모형실험

#### 3.3.1 운동 플랫폼

모형실험에 사용할 운동 플랫폼은 선박의 불규칙한 6자유도 운동을 정확하게 모사할 수 있어야 한다. 이를 위해 사전에 운동 플랫폼의 정확도를 검증해야 하며 정확도 검증은 플랫폼과 독립적인 운동 측정 시스템을 바탕으로 수행해야 한다. 플랫폼의 각 입력 및 출력 운동의 진폭 및 주기에 대한 편차는 3% 미만일 것을 권고하며, 편차가 3%보다 클 경우 입출력 운동의 편차가 슬로싱 압력에 미치는 영향을 추가적으로 살펴볼 필요가 있다. 최근 입출력 운동의 오차가 슬로싱 충격압력에 미치는 영향을 살펴본 연구가 있으나 가진 조건이 한정적이어서 일반화하기에는 어려움이 있으며 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다 (Mehl et al. 2013; Neugebauer et al. 2017). 전세계적으로 슬로싱 모형실험에 가장 널리 사용되는 운동 플랫폼은 스튜어트 타입의 운동 플랫폼이다. 스튜어트 플랫폼은 6개의 액추에이터 길이 변화를 통하여 플랫폼 상판의 6자유도 운동을 모사하는 기구로서 슬로싱 실험과 관련된 많은 연구에서 널리 사용되고 있다 (Gavory, 2005; Kim et al., 2012).

주의할 점은, 실험을 수행하고자 하는 운동 조건이 보유한 운동 플랫폼의 운동한계 내에서 구현 가능한지를 실험이전에 확인해야 한다는 것이다. 모션 성능의 측면에서, 모션 플랫폼은



구현해야 할 것으로 예상되는 최악의 탱크 운동을 고려하여 설계되어야 한다. 모션 플랫폼의 용량의 점검은 1자유도 운동 뿐만 아니라 6자유도의 조합된 운동에 대해서도 수행되어야 한다. 6자유도 동작의 변위, 속도, 가속도를 주의 깊게 검증해야 한다. 또한, 부하 용량은 액체로 채워진 목표 모델 탱크를 가진 할 수 있는 수준이어야 한다 (Gavory, 2005).

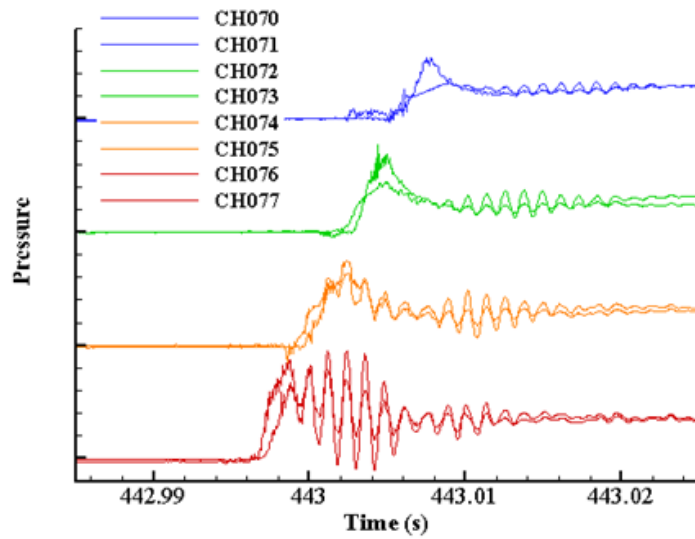
### 3.3.2 화물창 모형

화물창 모형은 실선 화물창의 기하학적 형상을 가급적 정확히 따르는 것이 중요하다. 특수한 경우가 아니라면 내부 유동을 파악하기 위해 투명한 재료를 활용하여 화물창 모형을 만들어야 하며, 이 같은 이유로 35mm 두께 이상의 두꺼운 아크릴이 현재까지 모형 탱크의 제작에 가장 널리 활용되고 있다.

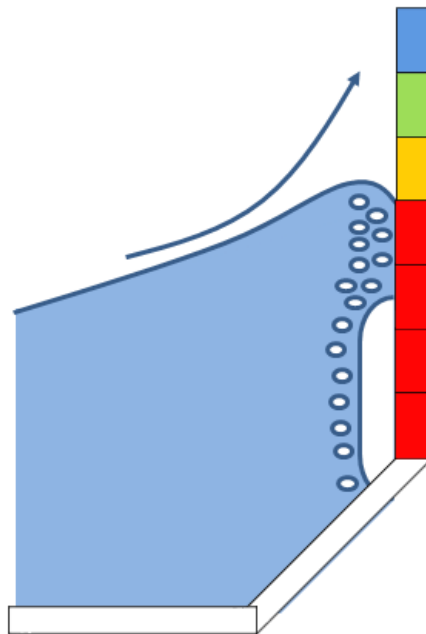
또한 모형 탱크는 탱크자체의 탄성으로 인해 압력 계측값이 방해 받지 않도록 단단하게 만들어져야 한다. Fig. 3-2에 슬로싱 모형실험을 통해 단일 패널에 위치한 인접한 센서들에서 계측된 압력신호의 예를 나타내었다. 압력신호를 살펴보면 동일한 패널에서 나타난 압력신호가 탱크 높이방향 위치에 따라 각기 다른 시점에서 피크치를 보이며 압력신호가 진동하는 시점 또한 차이가 있는 것을 미루어 보아 모형 탱크 혹은 센서패널의 진동이 압력계측 결과에 영향을 미친 것은 아님을 확인할 수 있다.

LNG와 BOG(Boil-off gas)로 인해 발생하는 슬로싱을 모사하기 위해 가장 보편적으로 모형 실험에 사용되는 탱크 내 유체는 공기와 물이다. 탱크 내 유체 사이의 밀도비에 대한 유사성을 개선하기 위해서 공기보다 무거운 기체혼합물을 사용할 수도 있다. 최근 질소 (N<sub>2</sub>)와 황 헥사 플루오 라이드 (SF<sub>6</sub>)의 혼합물을 활용하여 유체의 밀도비가 슬로싱 하중에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바가 있다 (Maillard et al., 2009; Ahn et al., 2012).

연구결과에 따르면 기체-액체의 밀도비(  $\rho_{gas} / \rho_{liquid}$  )가 증가할수록 예측되는 슬로싱 하중이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 최근에 2차원 모형 탱크에서 표면장력이 슬로싱 하중에 미치는 영향에 대한 연구가 수행된 바 있다 (Frihat et al., 2017). Frihat의 논문에 따르면 표면장력의 차이는 탱크 가진 시 유기되는 슬로싱 유동의 전반적 및 국부적 형상을 변화시키며, 작은 표면장력의 유체를 사용한 실험 시 유동에 더욱 작은 기포를 수반하여, 탱크 벽면에 상대적으로 작은 충격을 야기함을 언급하고 있다. 결과적으로 실제 화물창내의 LNG의 표면장력에 비해 큰 표면장력을 갖는 물과 공기를 이용한 모형실험의 경우 실제 현상에 비해 보수적인 결과를 추정한다고 볼 수 있다.



(a) Pressure time history due to sloshing impact on lower corner of side wall



(b) Explanation of sloshing impact scenario

Fig. 3-2 Investigation of influence of tank vibration on measured sloshing pressure

Table 3-7 Requirement of tank model for sloshing test

	Description
Manufactured tank	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The geometry should be exactly modeled</li> <li>• Transparent material</li> <li>• Sufficiently rigid (check the influence of tank vibration on measured pressure)</li> </ul>
Liquid inside the tank	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basically, water and air</li> <li>• Heavy gas can be used instead of air (in order to match the density ratio of liquid and gas of LNG cargo)</li> </ul>

### 3.3.3 압력센서

모형실험에 사용하는 압력센서는 슬로싱 하중을 계측하기에 적합해야 한다. 슬로싱 모형실험에 적합한 압력센서는 다음과 같은 특성을 따라야 한다.

- 압력 센서는 습한 상태에서 사용할 수 있어야 하며 온도 변화에 민감하지 않아야 한다 (Kim et al., 2015).
- 압력 센서가 탱크 내부 유동을 방해하지 않도록 탱크 내벽면에 매끈하게 설치가 가능한 형태여야 한다.
- 국부적인 성향이 큰 슬로싱 충격을 계측하기 위해 압력센서의 계측 면적은 작아야 하며, 여러 개의 압력

센서를 클러스터 형태로 설치할 수 있어야 한다.

- 압력 센서는 강한 충격 저항을 가져야 하며 측정된 압력은 탱크의 운동, 슬로싱 충격 및 기타 가능한 소음원이 있는 구조물에 의해 간섭받지 않아야 한다.
- 압력 센서의 측정 용량은 예상되는 슬로싱 압력보다 충분히 높아야 한다.
- 압력 센서의 응답은 슬로싱 충격을 포착 할만큼 충분히 높아야 한다 (Repalle et al., 2010). 압력 센서의 응답은 센서의 고유 진동수와 밀접한 관련이 있다.

슬로싱 현상으로 인해 나타나는 충격압력은 강한 국부적인 특성을 보이며 (Fig. 3-4), 그 정도는 슬로싱 충격 시나리오에 따라 차이가 있다. 국부적인 지역에 발생하는 큰 압력값을 놓치지 않기 위해서는 모형실험 시 주요 위치에 압력센서를 최대한 조밀하게 분포시키는 것이 중요하다. 본 논문에서 제안하는 클러스터의 센서배치밀도는 9개의 센서가 실선 기준 1.5m x 1.5m 면적을 대표하는 것이다. 센서의 위치는 시험의 목적에 따라 결정되어야 하며 특별한 목적이 없는 경우 큰 슬로싱이 발생할 것으로 예상되는 지점, 소위 핫스팟 (hotspot)에 집중하여 배치해야 한다. 일반적인 멤브레인형 화물창의 슬로싱 핫스팟을 Fig. 3-3에 나타내었다. 압력센서는 탱크 모서리에 가급적 가깝게 배치하는 것이 바람직하다.

Table 3-8 Requirements related with pressure sensor for sloshing test

	Description
Requirements of pressure sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Applicable in wet condition</li> <li>• Flush mounting type</li> <li>• Small effective sensing area</li> <li>• Strong shock resistance</li> <li>• Measurement capacity</li> <li>• High frequency response (high natural frequency)</li> </ul>
Installation of pressure sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Install pressure sensors as clusters for expected hotspots for sloshing pressure</li> <li>• The cluster recommended to be placed as close to the edge as possible</li> </ul>
Size of cluster panel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 9 sensors on 1.5m x 1.5m at full scale</li> </ul>

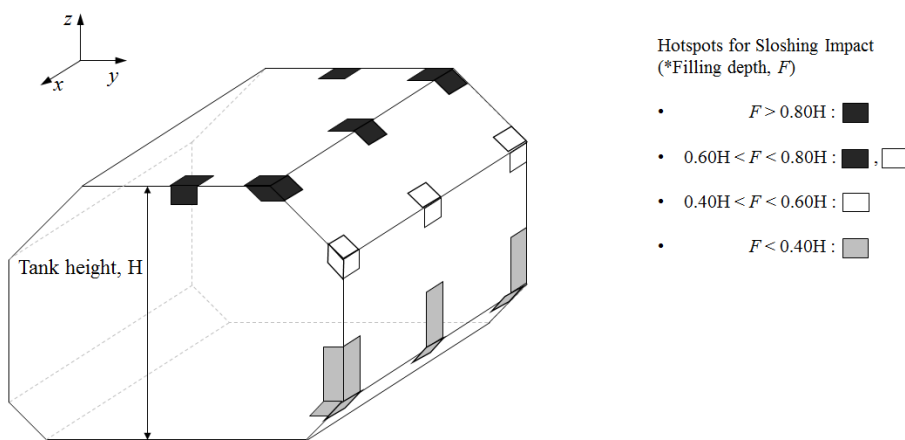


Fig. 3-3 Example of hotspots of sloshing impact

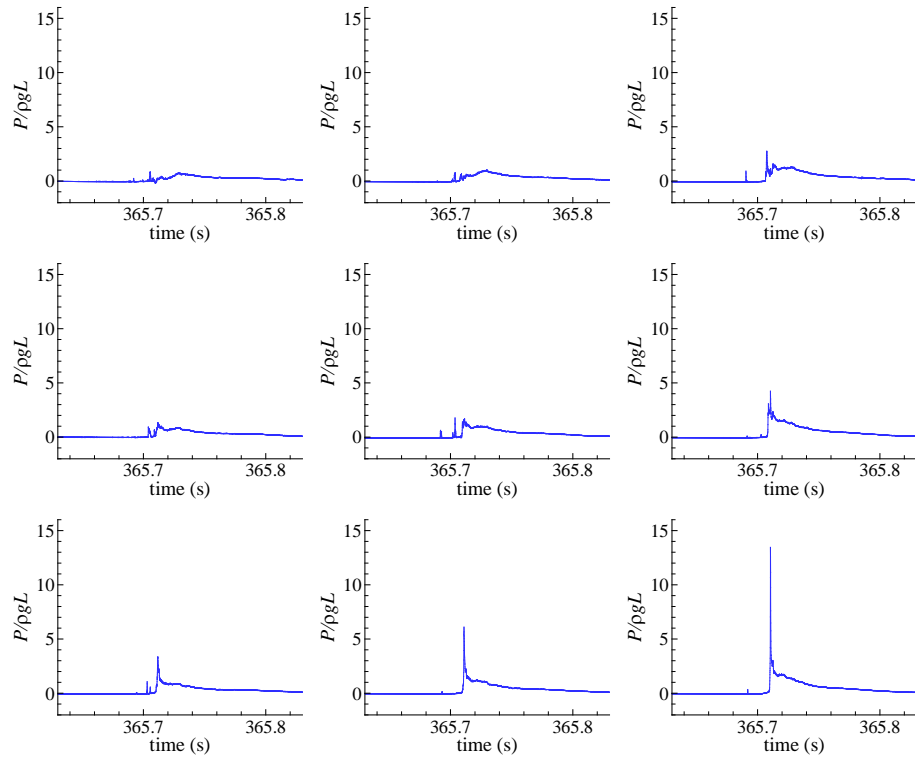


Fig. 3-4 Locality of sloshing impact - time history of pressures of 3x3 sensors located at the same cluster panel, filling depth=0.70H, tank roof

### 3.3.4 영상 계측

실험 영상을 촬영하는 것은 해당조건에 발생하는 슬로싱 현상의 전반적인 경향 분석에 있어 유용하다. 기본적으로 탱크의 움직임과 내부 유동을 동시에 확인할 수 있도록 운동 플랫폼과 독립적인 위치에서 실험 영상을 촬영 해야 한다 (Fig. 3-5). 탱크의 운동을 제외한 내부 유동만을 관찰할 필요가 있을 경우 비디오 카메라를 운동 플랫폼에 고정하여 촬영할 수도 있으며, 국부적인 슬로싱 충격의 세밀한 모습을 확인하고자 한다면 고속카메라를 활용할 수도 있다. Lungi et al. (2006)와 Yang et al. (2016)은 입자 영상 유속계 (Particle Image, Velocimetry, PIV) 기술을 활용하여 모형 실험에서 발생하는 슬로싱 유동의 속도벡터를 계측하는 연구를 수행한 바 있다.



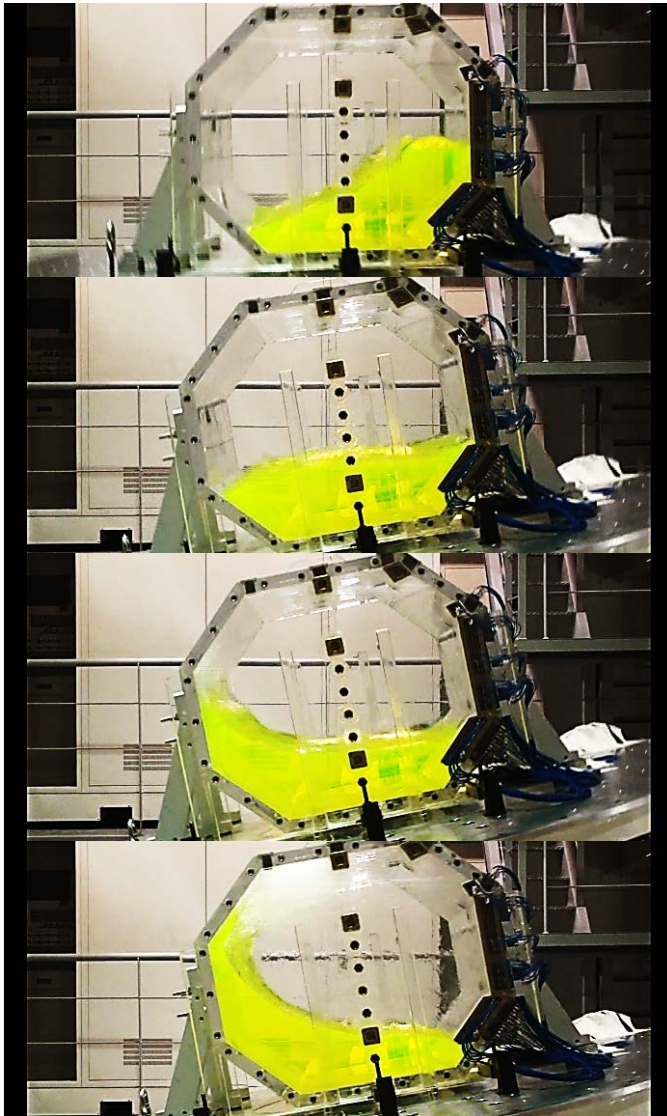


Fig. 3-5 Example of recording free surface movement of model test using earth-fixed camera

## 3.4 압력 데이터의 통계 해석

### 3.4.1 데이터 필터링

압력 원시 데이터 (raw data)에는 정수압, 파에 의한 저주파 압력 및 기타 소음이 포함될 수 있다. 시험이 충격 시간이 짧은 충돌 압력에만 관심이 있는 경우 저주파 압력 성분을 제거하기 위해 주파수 필터를 압력 원시 데이터에 사용할 수 있다. 차단 주파수는 슬로싱 이벤트의 응답주기, 구조 고유 주파수 및 압력 센서의 특성 등을 기준으로 정의해야 한다.

### 3.4.2 압력 데이터의 평균화

화물창의 구조응답을 계산하기 위해서는 슬로싱 압력값과 함께 해당 압력이 작용하는 작용면적이 필수적으로 요구된다. 슬로싱 현상으로 인해 나타나는 충격압력은 강한 국부적 특성 보이므로 각 하중이 작용하는 면적의 크기에 따라 대표하중의 크기 또한 상당히 큰 편차를 보이게 되며, 화물창의 구조강도 평가를 위한 설계하중은 작용면적에 따라 다르게 설정되어야 한다. 따라서 슬로싱 모형실험을 통해 계측한 압력 값 또한 다양한 작용면적에 따라 다양한 방법으로 살펴볼 필요가 있다. 3x3 형태의 클러스터를 기준으로 할 경우 Fig. 3-6과 같이 다양한 작용면적에서의 슬로싱 압력신호를 고려할 수 있다.

1) 원시 데이터 9채널: 1 x 1 압력센서

: {P<sub>11</sub>}, {P<sub>12</sub>}, {P<sub>13</sub>}, {P<sub>21</sub>}, {P<sub>22</sub>}, {P<sub>23</sub>}, {P<sub>31</sub>}, {P<sub>32</sub>}, {P<sub>33</sub>}

2) 평균화한 데이터 4채널: 2 x 2 압력센서 평균화

: {P<sub>11</sub>, P<sub>12</sub>, P<sub>21</sub>, P<sub>22</sub>}, {P<sub>12</sub>, P<sub>13</sub>, P<sub>22</sub>, P<sub>23</sub>}, {P<sub>21</sub>, P<sub>22</sub>, P<sub>31</sub>, P<sub>32</sub>}, {P<sub>22</sub>, P<sub>23</sub>, P<sub>32</sub>, P<sub>33</sub>}

3) 평균화한 데이터 1채널: 3 x 3 압력센서 평균화

: {P<sub>11</sub>, P<sub>12</sub>, P<sub>13</sub>, P<sub>21</sub>, P<sub>22</sub>, P<sub>23</sub>, P<sub>31</sub>, P<sub>32</sub>, P<sub>33</sub>}

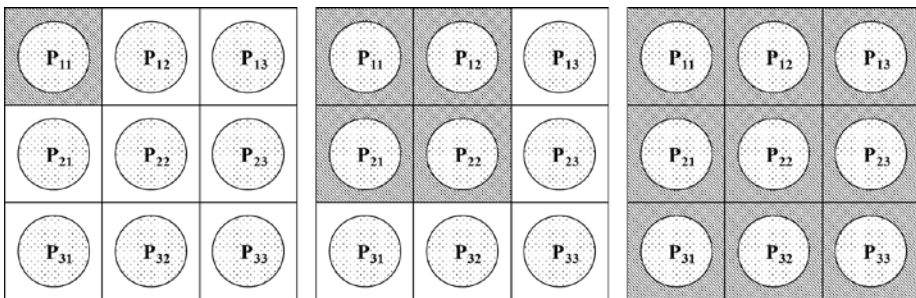


Fig. 3-6 Averaging of pressure data of 3x3 sensors: single (left), 2x2 (middle), and 3x3 sensors (right)

### 3.4.3 슬로싱 충격 표본 추출 / 이상화

실험 결과를 분석하기 위해서 압력신호 데이터로부터 통계해석에 사용할 유효한 충격압력신호를 추출할 필요가 있다. 충격압력신호 추출에는 Peak Over Threshold 방법 (이하 POT 방법)을 사용한다. POT 방법은 압력신호 중 임계 압력값 (threshold pressure) 이상의 값이 계측된 신호를 우선적으로 선별하고 추출시간간격 (sampling time window) 내에서 가장 큰 압력신호를

최종적으로 추출하는 방법이다. 임계 압력값은 계측 시스템에서 발생하는 노이즈 (noise)나 아주 작은 압력 피크치를 걸러낼 수 있어야 한다. 반대로 그 크기를 너무 과하게 설정하면 일반적인 수준의 슬로싱 충격 하중 또한 추출하지 못하므로 적절한 값을 설정하여 통계해석 결과가 왜곡되지 않도록 주의해야 한다. POT 방법을 통한 슬로싱 충격압력신호 추출의 예를 Fig. 3-7에 나타내었다.

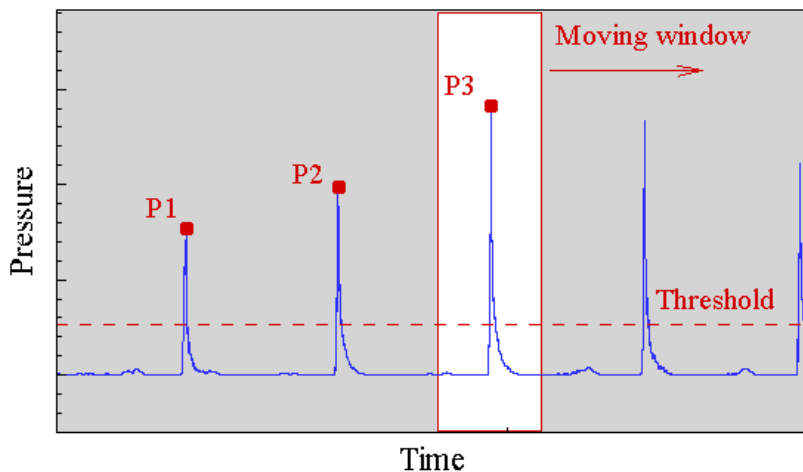


Fig. 3-7 POT method for single channel data

POT 방법을 각 각의 개별 센서 신호로부터의 압력 시계열에 대하여 적용하면 해당 채널에서 나타난 슬로싱 충격압력을 추출하여 해석에 사용할 수 있다. 그러나 슬로싱 충격의 국부성으로 인하여 특정 센서 패널에 위치한 센서들 혹은 계측에 사용한 압력센서 전체로부터 충격압력을 수집하여 해석결과를

고찰하는 것이 더욱 의미가 있을 수 있다. 이러한 경우 각 슬로싱 충격마다 가장 큰 슬로싱 압력 피크치가 발생한 충격만을 수집하는 방식으로 다 채널 압력시계열의 슬로싱 충격 샘플을 추출할 수 있다. 단일 채널 압력 시계열과 다 채널 압력 시계열에 대하여 POT방법을 적용하는 과정을 비교하여 Fig. 3-8에 나타내었다.

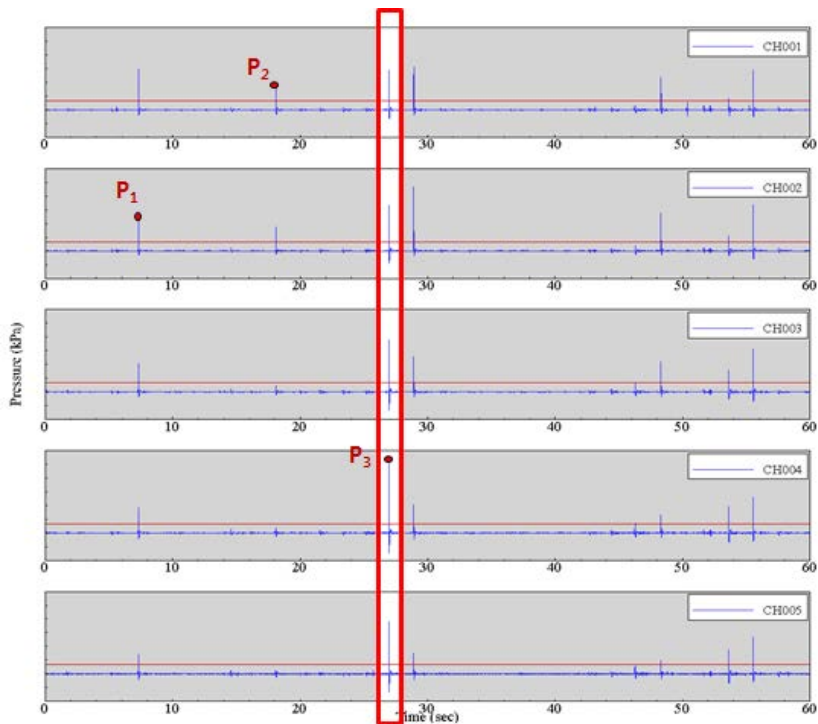


Fig. 3-8 POT method for multiple channel data

추출된 충격압력신호는 Fig. 3-9과 같이 삼각형의 형태로 단순화하여 모델링한다. 삼각형 형태의 형상 모델링에서 모델링 인자는 최대 충격압 ( $P$ ), 상승시간 ( $T_r$ ), 하강시간 ( $T_d$ ), 지속시간

(  $T_{duration}$  ) 등이 있다. 최대충격압은 충격압력신호 중 가장 큰 압력값으로 정의한다. 상승시간과 하강시간은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$T_r = \frac{t_P - t_{(\alpha_r \cdot P) \text{ up-crossing}}}{1 - \alpha_r} \quad (3-1)$$

$$T_d = \frac{t_{(\alpha_d \cdot P) \text{ down-crossing}} - t_P}{1 - \alpha_d} \quad (3-2)$$

$$T_{duration} = T_r + T_d \quad (3-3)$$

여기서  $t_P$  는  $P$  의 압력값이 계측된 시각을 의미한다. 마찬가지로  $t$  아래 첨자들 또한  $\alpha_r \cdot P$  에 해당하는 압력값이 계측된 시각을 의미한다. 본 방법은 상승·하강시간을 각 충격압력신호의 최대 충격압에 기준하여 정의하는 방법으로 각 충격압력신호마다 상대적인 기준을 적용하는 방법이다. Fig. 3-9의 예시는  $\alpha_r$  와  $\alpha_d$  를 1/2로 적용한 경우로 대부분의 국제 선급들이 사용하고 있는 값이다. Kim et al. (2014)는  $\alpha_r$  와  $\alpha_d$  값의 변화에 따른 상승시간과 하강시간의 민감도 연구를 수행한 바 있다.

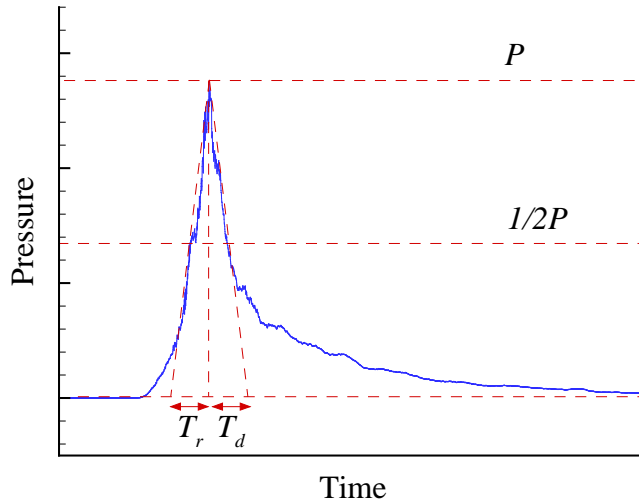


Fig. 3-9 Definition of rise time & decay time

#### 3.4.4 차순정렬 및 통계량 추정

실험 데이터로부터 통계해석 결과를 얻기 위해서는 우선 추출된 충격압력신호 샘플들을 최대 충격압에 따라 내림차순 정렬할 필요가 있다. 정렬 후 충격압력신호의 최대 충격압들은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_1 > P_2 > \dots > P_{n-1} > P_n \quad (3-4)$$

여기서  $n$ 은 통계해석에 사용되는 충격압력신호 샘플의 개수이다. 압력의 크기들을 정렬한 후에  $1/k$  상위압력의 평균,  $k$ 개 상위압력의 평균 등의 통계량을 구할 수 있다.

$$P_{\text{avg. } 1/k \text{ largest}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i \quad (3-5)$$

$$P_{\text{avg. } k \text{ largest}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_i \quad (3-6)$$

여기서  $m$  은  $1/k$ 의 상위압력에 해당하는 관측치의 개수를 의미한다.

### 3.4.5 극치 분포함수 근사

슬로싱 충격하중의 확률분포 모델에 대한 선구적 연구는 Mathiesen (1976)과 Gran (1981)에 의해 수행되었다. Mathiesen은 불규칙 종동요 운동 슬로싱 모형시험을 수행하여 그 결과를 Weibull 분포함수에 적용한 통계해석을 수행하였다. Gran은 모형시험 결과를 Frechet 분포 함수에 적용시켜 통계해석을 수행하였다. Fillon et al. (2011)은 Weibull 분포함수, Generalized Pareto 분포함수, 그리고 Generalized Extreme Value 분포함수의 세가지 함수에 대하여 분포함수 적합도 테스트 (Goodness of fit test)를 수행하였다.

슬로싱 3변수 Weibull 분포함수는 슬로싱 압력 극값 추정에 보편적으로 사용되는 극치분포 함수이다. Global peak의 최대 충격압의 누적확률분포를 Weibull 분포 함수의 누적확률분포에 근사한다. 3 변수 Weibull 분포함수의 확률밀도함수 (Probability density function, PDF)와 누적분포함수 (Cumulative distribution



function, CDF)는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x-\delta}{\beta} \right) \exp \left\{ - \left( \frac{x-\delta}{\beta} \right)^\gamma \right\} \quad (3-7)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{x-\delta}{\beta} \right)^\gamma \right\} \quad (3-8)$$

변수  $x$ 의 범위는  $\delta \leq x < \infty$  이다.  $\delta$  는 위치모수 (location parameter),  $\beta$  는 척도모수 (scale parameter),  $\gamma$  는 형상모수 (shape parameter) 이다. 각 모수들을 구하기 위한 다양한 방법들이 존재한다 (모멘트법(method of moment), L모멘트법 (method of L-moment), 최대 우도 추정법 (maximum likelihood estimation)). 그 중 가장 많은 연구자들에 의해 사용되는 방법은 모멘트 방법으로, 모멘트법을 이용한 Weibull 분포함수의 모수를 추정하는 방법을 아래에 나타내었다.

### 모멘트 법을 이용한 모수추정

모멘트법 (method of moment)은 실험으로부터 얻은 관측값, 즉 global peak의 샘플의 압력값의 평균 ( $\hat{\mu}$ ), 분산 ( $\hat{\sigma}^2$ ), 와도 ( $\hat{\gamma}_1$ )의 세가지 모멘트를 모델의 평균( $\mu$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 와도( $\gamma_1$ ) 와 일치시키는 방법으로 모수들을 추정한다. 모델의 평균, 분산 및

와도는 아래와 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3-9)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \hat{\mu})^2 \quad (3-10)$$

$$\hat{\gamma}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right)^3 \quad (3-11)$$

여기서  $p_i$ 는 총  $n$ 개의 표본 중  $i$ 번째 크기의 관측값을 의미한다. Weibull 누적분포함수 모델의  $\mu$ ,  $\sigma^2$ ,  $\gamma_1$ 는 아래와 같다.

$$\mu = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) + \delta \quad (3-12)$$

$$\sigma^2 = \beta^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\gamma}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \right] \quad (3-13)$$

$$\gamma_1 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\gamma}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{\gamma}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{\left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\gamma}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \right]^{3/2}} \quad (3-14)$$

여기서  $\Gamma(x)$ 는 감마 함수이다. 형상모수인  $\gamma$ 는 표본의 와도  $\hat{\gamma}_1$ 와 모델의 와도  $\gamma_1$ 를 일치시킴으로써 얻을 수 있다. 척도모수

$\beta$ 는 표본의 분산  $\hat{\sigma}^2$ 와 모델의 분산  $\sigma^2$ 을 일치시킴으로써 얻을 수 있다. 마지막으로 표본의 평균  $\hat{\mu}$ 와 모델의 평균  $\mu$ 를 일치시킴으로써 위치모수  $\delta$ 를 얻을 수 있다. Weibull 분포함수의 특수한 경우로  $\delta=0$ ,  $\gamma=1$ 인 경우 그 형태가 지수함수와 같고,  $\delta=0$ ,  $\gamma=2$ 인 경우 Rayleigh 분포함수와 같다.

### 최소제곱법을 이용한 모수 추정

본 연구에서는 모멘트법과 함께 최소제곱법 (least-square method)을 이용한 모수 추정방법을 소개한다. 최소제곱법은 특정 계의 해방정식을 근사적으로 구하는 방법으로, 근사적으로 구하려는 해와 실제 해의 오차의 제곱의 합이 최소가 되는 해를 구하는 방법으로 앞선 모멘트 방법과는 달리 극치분포함수의 형태가 바뀐다 하더라도 동일한 방법을 통해 분포함수의 모수를 추정할 수 있다.

n개의 관측값 (global peak)과 그에 대응하는 출력값 ( $P_i$ ,  $Y_i$ )를 활용할 경우 n개의 방정식이 존재한다. 해당하는 방정식은 아래와 같다.

$$Y_i = F(P_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q) + \varepsilon_i \quad \text{for } i=1, \dots, n \quad (3-15)$$

여기서  $n$ 은 표본의 수이고,  $F$ 는 누적확률분포함수,  $\theta$ 는 누적확률분포의 모수,  $q$ 는 누적확률 분포의 파라미터의 개수,  $Y_i$ 는 관측값을 기준으로  $P_i$ 의 값이 가질 것으로 기대되는 누적확률

값이다. 또한  $\varepsilon_i$  는 랜덤성에 의한 오차이며 일반적으로 정규분포를 따른다. 근사값  $n$ 이 충분히 큰 경우  $Y_i$ 는 아래와 같이 정의할 수 있다. (Makkonen, 2008)

$$Y_i = \frac{n+1-i}{n+1} \quad \text{for } i=1,...,n \quad (3-16)$$

이때 누적확률 근사값과 실제값의 차이인 잔차 (residual)는 다음과 같이 정의할 수 있다 (Lu et al. 2004).

$$r_i = \frac{(Y_i - F(P_i; \theta_1, \theta_2, ..., \theta_q))}{Y_i} \quad (3-17)$$

이때 잔차제곱합 (residual sum of squares)을 최소가 되게 하는 모수들의 조합  $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, ..., \hat{\theta}_q)$ 를 구할 수 있다.

$$Minimize_{\hat{\theta}} = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3-18)$$

구하고자 하는 함수가 비선형 모델이기 때문에 최소제곱법을 활용한 모수의 추정량을 구하기 위한 과정에서 모수에 대한 편미분이 모수의 함수로 나타나므로 해석적 방법으로 해를 구하는 것이 쉽지 않다. 이에 최적화 방법을 이용할 경우 모수를 추정할 수 있다. 본 연구에서 채택한 최적화 방법은 개미 집단

최적화 (Ant Colony Optimization) 알고리즘을 적용한 상용 최적화 프로그램인 Midaco 이다 (Dorigo, 1992; Schlueter, 2009; Schlueter, 2013). 개미 집단 최적화 알고리즘은 식민지와 식량 공급원 사이의 경로를 모색하는 개미의 행동을 모방한 메타-발견적학습 (Meta-heuristic) 방법이다. Heuristic의 특성상 최적의 해를 판단하는 기준은 일정시간의 반복 내 최적의 해를 도출하는 것을 목표로 한다.

#### 3.4.6 이상치의 정의

이상치 (outlier)의 확인 및 분석은 실험 및 데이터 분석을 수행하는 연구에서 필수적으로 고려해야 하는 단계 중 하나이다. 이상치의 개념은 Czuber (1891)에 의해 처음 시작되었으며, Dixon, (1953) 과 Grubbs (1969)에 의해 체계적으로 발전되었다. 이상치 분석과 관련된 초기의 연구는 표본에서 이상치는 하나 이하로 존재한다는 가정에서부터 시작하였고, 향후 Tukey (1977)에 의해 사분범위 (Interquatile range, IQR)를 활용하여 하나 이상의 이상치 후보를 탐지하는 방법이 연구되었으며, 이후의 이상치 분석관련 연구들은 다수의 이상치가 존재할 수 있다는 가정하에 수행되어오고 있다.

이상치가 포함된 실험 데이터를 바탕으로 연구결과를 분석할 경우 자칫 잘못된 결론을 도출할 가능성이 있으므로 결과를 해석하기 이전에 충분한 이상치 탐지 및 처리가 이루어져야 한다. Grubb (1969)는 이상치를 처리하는 방법에 대한 체계적인 방법을

제시하였다. Grubb은 발견된 이상치를 처리하는 방법을 아래와 같이 나누고 있다.

- 1) 해당 관측값을 제거한다
- 2) 해당 관측값을 새로운 관측값으로 대체한다
- 3) 해당 관측값을 물리적인 근거하에 수정한다 (정확한 물리적 원인이 파악된 경우)
- 4) 해당 관측값을 통계적 방법에 근거하여 수정한다 (정확한 물리적 원인이 파악되지 않은 경우)

아래와 같이 정확한 물리적 원인이 파악된 경우, 실험자의 판단하에 해당 관측값을 물리적 근거하에 수정할 수 있으며, 극단적인 방법으로 관측값을 표본에서 제거 혹은 새로운 관측값으로 대체 할 수 있다. 그러나 이상치의 원인이 파악되지 않은 경우 이상치에 대한 판단은 통계적인 방법으로 수행되는 것이 바람직 하고 해당 관측값의 처리에 있어서도 통계적 방법에 근거하는 것이 바람직하다.

### 이상치의 분류

본 논문에서는 슬로싱 모형실험 데이터에서 발생하는 이상치를 아래의 세 단계로 구분하며 이상치를 처리하는 방법을 아래와 같이 구분하고자 한다.

Table 3-9 Categorization of potential outliers

Categorization	Detection & treatment
1. Error outlier	Source: error in measurement Detection: check measured data Treatment: supplementary test
2. Not-interested outlier	Source: small droplet on pressure sensor Detection: area prescreening method Treatment: delete from the sample
3. Fitting outlier	Source: lack of convergence of measured data Detection: outlier analysis based on residual Treatment: adjust the measurement in statistical manner

### 3.4.7 비관심 이상치 분석

비관심 이상치 (not-interested outlier)는 계측된 압력의 피크치는 크지만 짧은 상승시간으로 인해 유사한 크기의 피크치를 갖는 다른 충격신호에 비하여 작은 임펄스 면적을 갖는 관측치를 해석에서 제외하는 방법이다 (Kim et al., 2010). 전반적인 충격압력 신호와는 달리 상대적으로 아주 작은 임펄스 면적을 갖는 충격 압력신호는 압력센서에 작은 물방울이 충격을 가해서 발생하는 것으로 실험을 통해 파악하고자 하는 탱크 내 적재된 유체 전반의 자유표면운동에 의해 발생하는 충격과는 다른 특성의 관측치이다.

앞서 설명한 물방울의 충격에 의해 발생하는 압력신호의

예를 Fig. 3-10~Fig. 3-11, 해당 충격발생 당시의 탱크 유동 및 압력 계측 위치를 Fig. 3-13에 나타내었다. 적재조건은 탱크높이의 70%이며 압력신호 계측위치는 탱크 측면의 상단부에 위치하고 있어 정상과의 형태를 보이는 슬로싱 유동에서 큰 충격 피크치가 발생하기 어려운 위치이다. 그럼에도 불구하고 탱크 상부 뚜껑의 슬로싱 충격 발생 시 산란된 일부 물방울이 반대편 벽면에 부딪혀 상대적으로 큰 피크치의 압력신호가 계측됨을 Fig. 3-10에서 확인할 수 있다. 이와 같이 물방울에 의해 발생한 충격의 경우 센서패널 전에 걸쳐 충격을 가하는 것이 일부 센서에만 충격이 나타나고 (Fig. 3-11), 작은 임펄스 면적의 큰 피크치를 갖은 충격신호는 구조응답의 관점에서 화물창에 큰 충격을 가하지 못하기 때문에 (Nho, et al., 2011), 압력의 피크치를 기반으로 1차적인 하중 예측을 하는 현재의 프로시저에 해당 관측치를 포함시키면 하중해석에 오류를 가져올 수 있다.

본 연구에서는 상위 10% 이상의 충격압력신호에 대하여 임펄스 면적의 크기가 전체 관측치의 중앙값을 넘지 못할 시 비관심 이상치로 판단한다 (Fig. 3-13). 앞서 살펴본 물방울에 의한 압력신호가 나타나는 조건의 규칙운동 실험데이터에 대하여 비관심 이상치 분석을 적용한 결과를 Fig. 3-14에 나타내었다. 물방울에 의해 발생하는 짧은 임펄스 면적을 갖는 큰 피크치의 충격 신호들이 비관심 이상치 분석을 적용할 경우 해석에서 제외된 것을 확인할 수 있다.



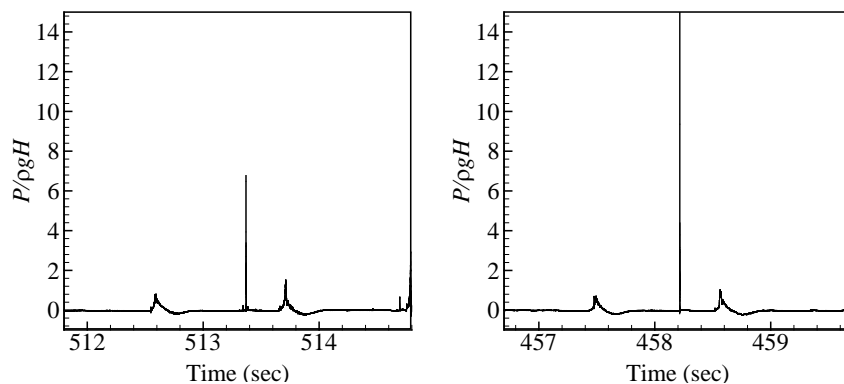


Fig. 3-10 Pressure peaks due to small droplet

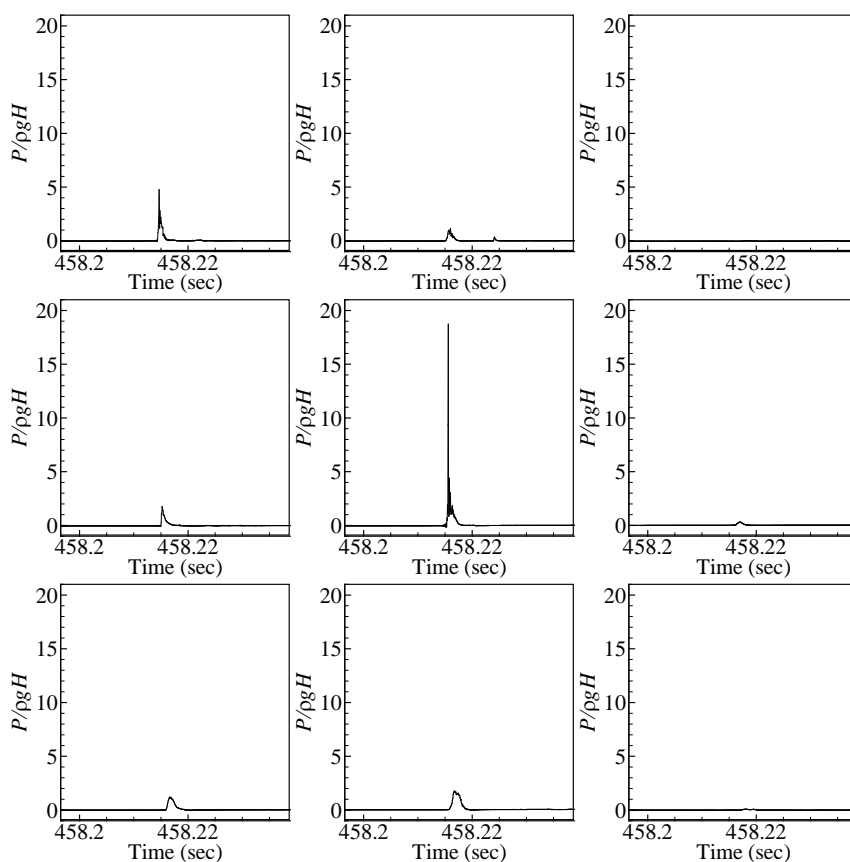


Fig. 3-11 Spatial distribution of pressure data when droplet hit the 3x3 cluster panel

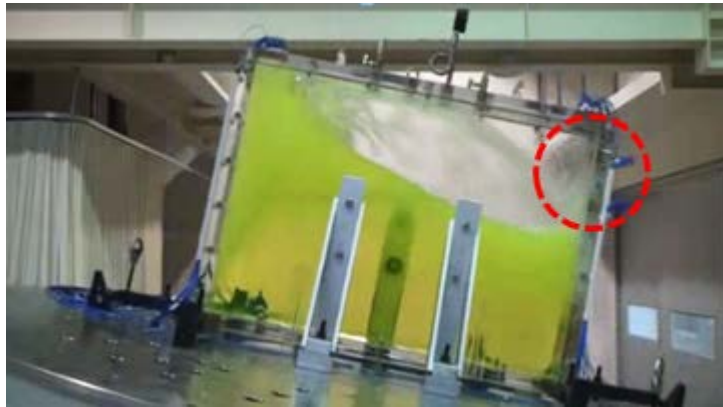


Fig. 3-12 Impact at the higher corner of side wall due to droplets, harmonic motion test using 2D tank.

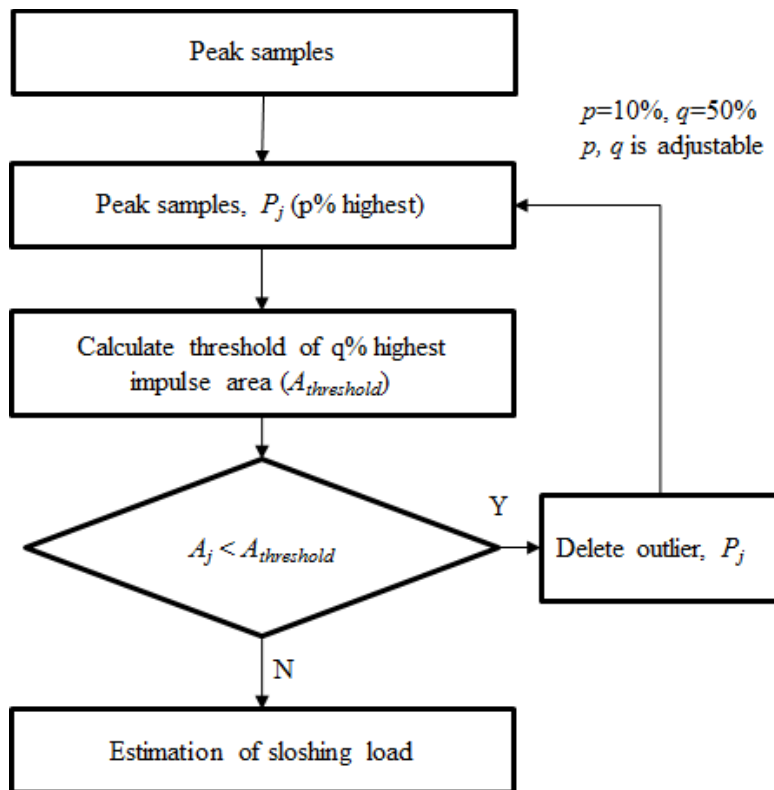


Fig. 3-13 Flowchart of non-interesting outlier analysis method

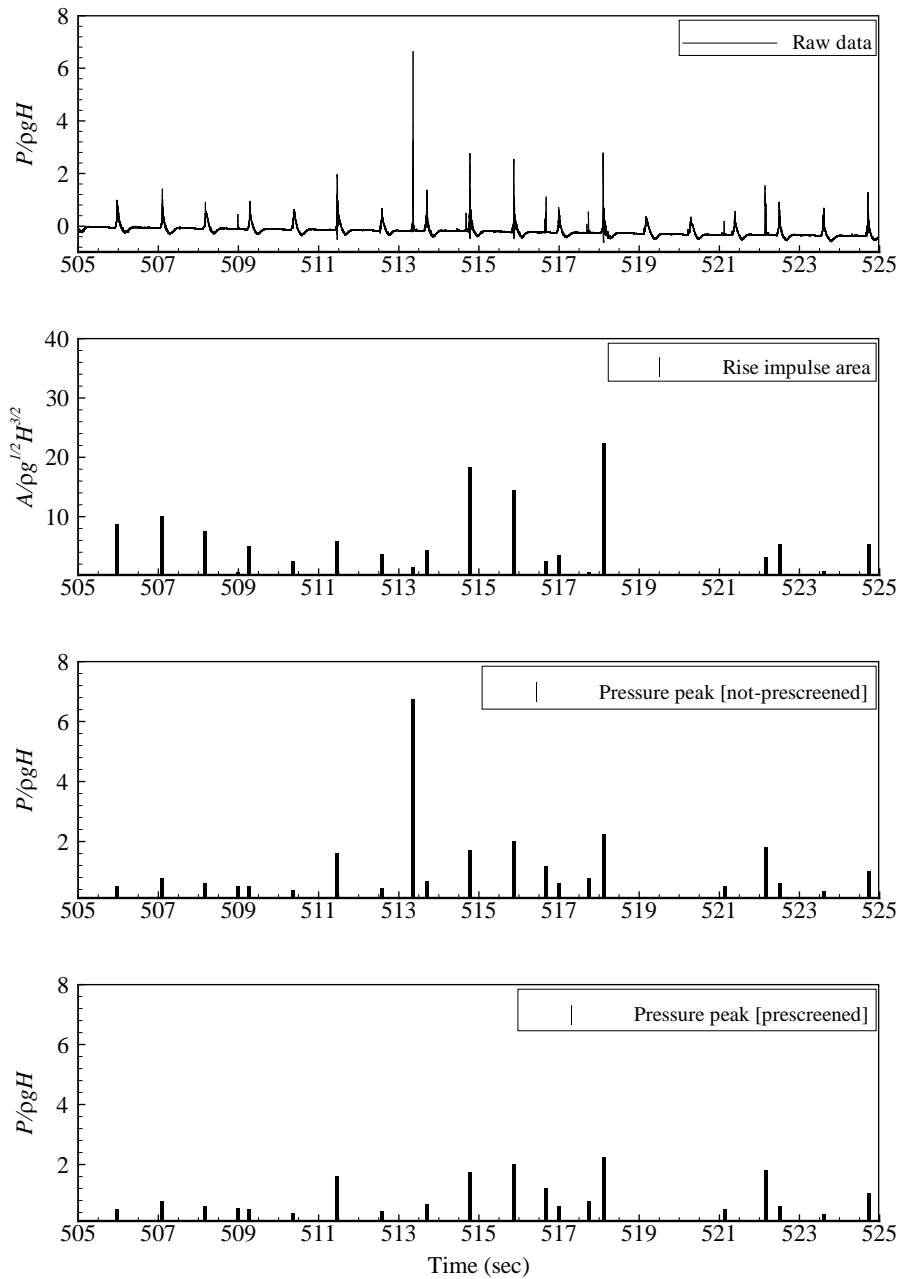


Fig. 3-14 Magnitude of pressure peak and rise impulse area of measured pressure data

### 3.4.8 함수근사 이상치 분석

본 논문에서는 실험결과의 수렴성 향상을 위한 함수근사 이상치 탐지 및 해석 방법을 소개한다. 본 분석을 적용하기 위해서는 슬로싱 충격신호의 피크치들의 확률 분포가 3변수 특정 극치분포함수 (본 연구에서는 Weibull 분포함수로 정의한다)로 표현이 가능하다는 가정이 필요하다.

함수근사 이상치 (fitting outlier)는 관측된 표본의 누적확률밀도함수를 극치분포함수로 근사하였을 때, 발생하는 잔차의 분포를 바탕으로 판단한다. 기본적으로 관측값에 이상치가 존재하지 않을 경우 잔차의 분포가 정규성을 가진다. 엄밀히 말해서 잔차가 독립적이며 정규분포를 따른다는 것은 선형 회귀분석의 표준 가정이지만, 잔차가 정확하게 정규 분포가 아니라 할지라도 표본의 크기가 충분히 크다면 중심 극한 정리는 정상성의 가정에 기초한 일반적인 추론이 여전히 정확할 것이라고 말한다 (Gasser, et al., 1986; Ryan et al., 1997).

잔차가 정규성을 갖는다는 전제하에 고전적인 이상치 분석방법을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 사분범위를 활용하여 하나 이상의 이상치 후보를 탐지하는 Tukey (1969)의 방법을 적용하였다. 사분범위를 활용하여 이상치를 탐지하는 방법은 아래와 같다 (Fig. 3-15). 1) 표본 데이터의 사분위수들을 계산한다. 2) 표본 데이터의 사분범위 (IQR)를 계산한다. 3) 제1사분위수에서  $\lambda \times \text{IQR}$ 을 뺀 후 이보다 작은 관측값은 이상치로 판단된다. 4)

제3사분위수에서  $\lambda \times \text{IQR}$ 을 더한 후 이보다 큰 숫자는 이상치로 판단한다. IQR에 곱해지는  $\lambda$ 는 가변의 상수이며 고전적인 사분위수 법을 따르면 1.5의 값을 갖는다. 향후 연구에서는  $\lambda$ 를 변화시켜가며 슬로싱 하중의 이상치 해석에 있어 상수의 변화가 미치는 영향을 살펴보았다.

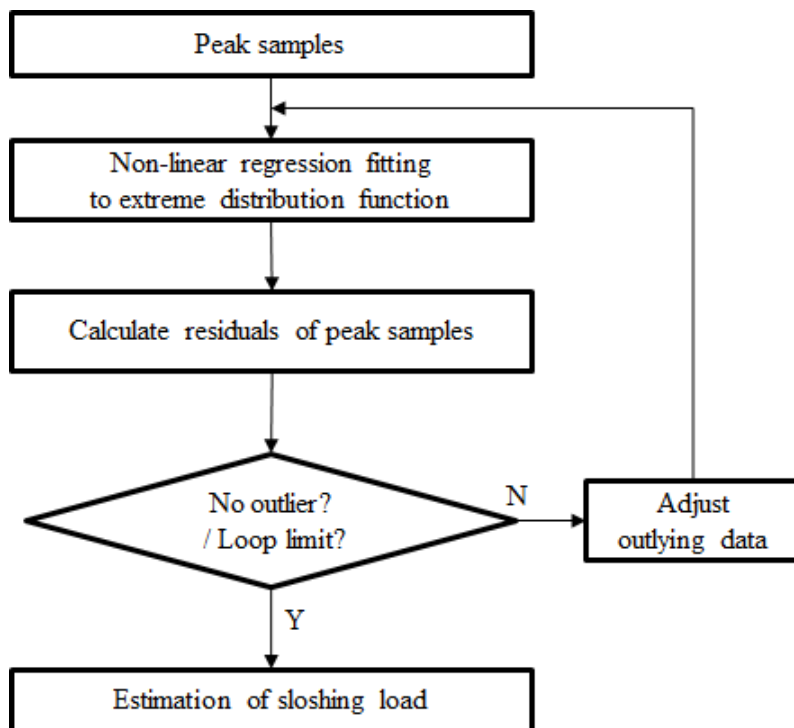


Fig. 3-15 Flowchart of ‘fitting-outlier’ analysis

해당 방법을 수식으로 나타내면 다음과 같다. 앞선 극치분포함수의 근사에 사용한 식을 기준으로 하여 이상치를 판단하는 기준은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{measurement } P_i \text{ is a outlier} \\ &\text{if } r_i > Q_3 + \lambda \cdot IQR \text{ or } r_i < Q_1 - \lambda \cdot IQR \end{aligned} \quad (3-19)$$

여기서  $r_i$  는 관측값  $P_i$  의 잔차,  $Q_1$ ,  $Q_3$  는 각각  $r_i$  표본들의 제1사분위수, 제3사분위수,  $IQR$  은 사분범위를 의미하며  $Q_3$  에서  $Q_1$  을 뺀 값이다.

이상치로 탐지된 값은 단순히 제거하거나 새 관측값으로 대체하는 방법이 아닌 통계적인 방법에 의거하여 수정하는 방법을 취하였다. 해당 내용을 정리하면 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{Replace the value } P_i \text{ to } P_i^* \\ &P_i^* = F^{-1}(Y_i^*) \end{aligned} \quad (3-20)$$

여기서  $P_i$  는 이상치로 판단된 관측값,  $P_i^*$  는 수정하고자 하는 값을 의미하며 해당값은 잔차가 사분범위 방법을 적용시 이상치로 판단되지 않는 범위 내에 들어오는 누적확률 값  $Y_i^*$  를 갖도록 수정한다. 이를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{Y_i^* - Y_i}{Y_i^*} = Q_3 + \lambda \cdot IQR \quad \text{if } r_i > Q_3 + \lambda \cdot IQR \quad (3-21)$$

$$\frac{Y_i^* - Y_i}{Y_i^*} = Q_1 - \lambda \cdot IQR \quad \text{if } r_i < Q_1 - \lambda \cdot IQR \quad (3-22)$$

아래의 그래프는 앞서 설명한 함수근사 이상치 해석의 예를 나타낸 것이다. 검은색 심볼과 실선으로 나타낸 것은 각각 이상치 해석을 수행하지 않은 실험데이터와 Weibull 분포함수 근사값이다. 이상치 해석을 수행할 경우 분포함수 근사값과 실험값이 나타내는 차이의 지표인 잔차  $r_i$  이 정규분포를 기준으로 비정상적으로 큰 값을 가질 경우 이상치로 판단하게 되며, 판단된 실험값은  $r_i$ 이 이상치로 판단되지 않는 수준으로 조정된다.

정규분포의 형상을 보이는 실험값에 대하여 사분위수 법을 이용하여 이상치를 판단 및 처리하는 방법은 기존의 실험적 연구에서 많이 이용되는 방법으로 (Tukey, 1969), 본 논문에서 적용한 방법의 특징은 정규분포의 형상을 따르지 않는 슬로싱 충격압력 관측값에 대하여 이상치 해석을 적용하기 위해 우회적으로 잔차에 대하여 사분위수 법 적용하여 이상치를 탐지 및 조정 후 나아가 2차적으로 관측값 (충격 압력 측정값)을 수정한다는 특징이 있다.

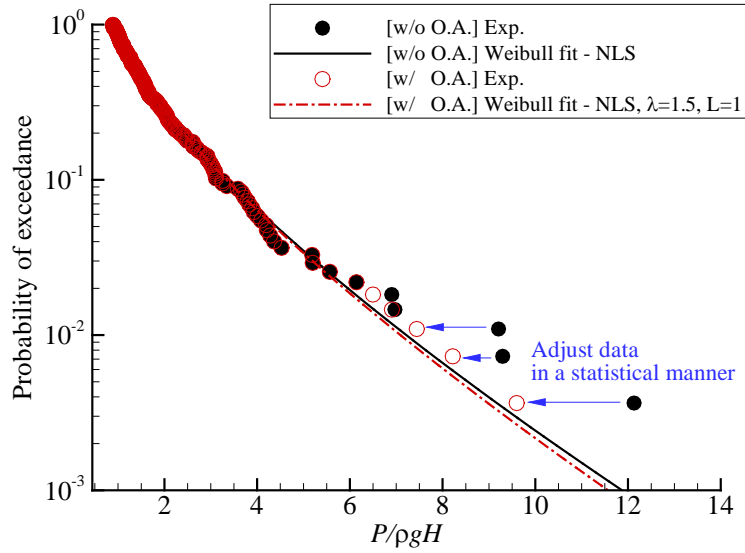


Fig. 3-16 Example of fitting outlier analysis

### 3.4.9 극치 하중 추정

실험 데이터를 Weibull 분포함수에 근사한 후 이를 이용하여 다양한 통계 추정치를 구할 수 있다. 우선 슬로싱 최대 충격압력값이  $P_\alpha$ 를 초과할 확률  $\alpha$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\alpha = 1 - F(P_\alpha) = \exp\left(-\left(\frac{P_\alpha - \delta}{\beta}\right)^\gamma\right) \quad (3-23)$$

위 식을 풀면  $P_\alpha$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_\alpha = \delta + \beta \left[ \log\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^\frac{1}{\gamma} \quad (3-24)$$



### 3.4.10 슬로싱 하중의 장기확률분포 추정

선박의 운항 중 압력값  $P$  이상의 슬로싱 하중을 겪게 될 확률, 즉  $P$ 에 대한 초과확률  $Q(P)$  는 아래와 같이 각각의 환경조건에서  $P$  이상의 슬로싱 하중이 발현될 확률의 합으로 표현된다.

$$Q(P) = \sum_{k=1}^{\text{\#Fillings}} \sum_{j=1}^{\text{\#Headings}} \sum_{i=1}^{\text{\#Sea States}} p_{ijk} \cdot \frac{R_{ijk}}{R} Q_{ijk}(P) \quad (3-25)$$

여기서  $p_{ijk}$  는  $k$ 의 적재조건,  $j$ 의 선수각,  $i$ 의 해상상태 (이하  $ijk$ 조건)를 운항할 확률값을 의미하고,  $R_{ijk}$  는  $ijk$ 조건에서 나타난 슬로싱 충격의 단위시간당 발현횟수,  $R$  은 전체 실험데이터 기준 평균 단위시간당 슬로싱 충격 발현횟수,  $Q_{ijk}(P)$  는  $ijk$ 조건에서 압력값  $P$ 에 대한 초과확률을 의미한다. 결국  $p_{ijk}$  의 경우 모형 실험을 수행하기 전에 해석조건의 선정 및 그룹화의 단계에서 결정되는 값이며 그 총합은 1이되어야 한다. 나머지 변수인  $R_{ijk}$ ,  $R$ ,  $Q_{ijk}(P)$  는 모형실험 결과를 바탕으로 추정할 수 있다.

## 4. 138k LNG 운반선 화물창의 슬로싱 하중 장기 예측

### 4.1 적용 모델 및 조건

#### 4.1.1 화물창 모델

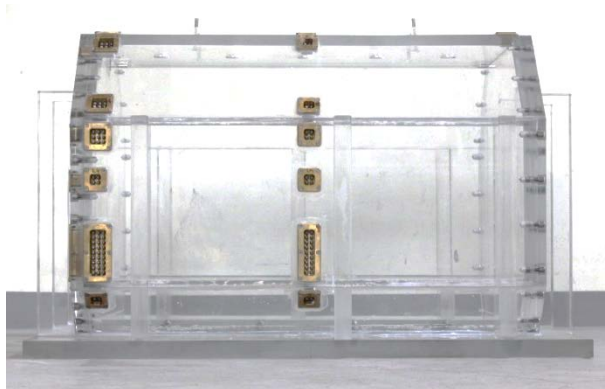
모형 실험에서 이용한 탱크는 138K LNG 운반선의 제2번 화물탱크이다. 모형탱크의 실선 제원을 Table 4-1에 나타내었다. 모형 탱크는 실선의 1/50 축소모형으로 제작되었고 제작된 탱크의 길이, 높이, 폭은 각각 868mm, 556mm, 760mm이다. 탱크는 35mm (bulkhead는 40mm) 두께의 아크릴로 제작하여 내부 유동을 관측할 수 있으면서도 유탄성 효과를 배제할 수 있도록 하였다. 제작된 모형탱크의 사진을 Fig. 4-1 그림에 나타내었다

Table 4-1 Specific dimension of manufactured tank model

Category	Description
Tank model	Tank No.2 of 138k LNGC
Tank length (L)	868.2 mm
Tank breadth (B)	760.0 mm
Tank height (H)	556.0 mm
Upper-chamfer height ( $H_{u.c.}$ )	169.3 mm
Lower-chamfer height ( $H_{l.c.}$ )	80.5 mm



(a) 정면



(b) 측면



(c) 사면

Fig. 4-1 Cargo tank of 138k LNGC, 1/50 scale model

#### 4.1.2 실험 조건

아래의 Table 4-2에 실험조건을 정리하여 나타내었다. 탱크높이 기준 95%의 높은 적재조건의 선수각 150도 조건, 15%의 낮은 적재조건에 대하여 선수각 90도 조건에서 모형실험을 수행하였다. 해상상태의 경우 IACS Rec. 34의 standard wave data의 전반을 포함하는 다양한 조건을 고려하였고, 각 조건들은 그룹화하여 대표적인 조건들을 선정하였다 (Table 4-3~Table 4-4) 선정된 조건은 아래의 표에 발생빈도와 함께 나타내었다. 각 환경조건에서 실선기준 5시간 모형실험을 2회 반복하여 각 조건 별로 실선기준 10시간에 해당하는 모형실험 데이터를 획득하였다.

Table 4-2 Summary of test condition

	Description
Model scale	1:50
Filling ratio	15, 95% of tank height
Heading angle	Beam sea at 15% fillings Quartering sea at 95% fillings
Wave condition	Selected from wave-scatter data
Test model	138k LNGC No.2 tank Ship speed = 5knots
Time window	5hours in real scale x 2 repeats

Table 4-3 Simplified wave scatter diagram for high filling condition

		Tz (sec)																	
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
Hs (m)	0.5	-	-	Tz 6.0, Hs 3.5, p 11.27%				Tz 7.5, Hs 3.5, p 36.71%		Tz 10.5, Hs 3.5, p 19.90%		Tz 13.5, Hs 7.5, p 2.95%		Tz 15.5, Hs 7.5, p 0.05%					
	1.5	-	-	-													-	-	-
	2.5	-	-	-													-	-	-
	3.5	-	-	-													-	-	-
	4.5	-	-	-	-	Tz 6, Hs 7.3, p 0.27%		Tz 7.5, Hs 7.5, p 7.92%		Tz 10.5, Hs 7.5, p 18.50%						Tz 15.5, Hs 7.5, p 0.05%		-	-
	5.5	-	-	-	-													-	-
	6.5	-	-	-	-													-	-
	7.5	-	-	-	-													-	-
	8.5	-	-	-	-													-	-
	9.5	-	-	-	-			Tz 7.5, Hs 11.1, p 0.17%		Tz 10.5, Hs 11.5, p 1.57%		Tz 13.5, Hs 11.5, p 0.58%				Tz 15.5, Hs 14.5, p 0.03%		-	-
	10.5	-	-	-	-													-	-
	11.5	-	-	-	-													-	-
	12.5	-	-	-	-													-	-
	13.5	-	-	-	-					Tz 10.5, Hs 15.2, p 0.04%		Tz 13.5, Hs 15.5, p 0.04%						-	-
	14.5	-	-	-	-													-	-
15.5	-	-	-	-													-	-	
16.5	-	-	-	-													-	-	

Table 4-4 Simplified wave scatter diagram for low filling condition

		Tz (sec)																		
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	
Hs (m)	0.5	-	-											-	-	-	-	-	-	
	1.5	-	-	-				Tz 7.5, Hs 3.5, p 36.71%		Tz 10.5, Hs 3.5, p 19.91%			Tz 13.5, Hs 3.5, p 0.68%			-	-	-		
	2.5	-	-	-													-	-	-	
	3.5	-	-	-			Tz 6.0, Hs 3.5, p 11.54%											-	-	
	4.5	-	-	-	-					Tz 10.5, Hs 5.5, p 13.33%			Tz 13.5, Hs 7.5, p 2.27%					-	-	
	5.5	-	-	-	-														-	
	6.5	-	-	-	-														-	
	7.5	-	-	-	-	-		Tz 7.5, Hs 8.3, p 8.1%		Tz 10.5, Hs 9.5, p 6.49%								Tz 15.5, Hs 7.5, p 0.09%	-	
	8.5	-	-	-	-	-													-	
	9.5	-	-	-	-	-													-	
	10.5	-	-	-	-	-	-												-	
	11.5	-	-	-	-	-	-												-	
	12.5	-	-	-	-	-	-				Tz 10.5, Hs 11.8, p 0.29%			Tz 13.5, Hs 11.0, p 0.62%					-	
	13.5	-	-	-	-	-	-	-											-	
	14.5	-	-	-	-	-	-	-											-	
	15.5	-	-	-	-	-	-	-	-										-	
16.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-									-		

### 4.1.3 탱크 운동 시계열 생성

Bretschneider wave energy spectrum 을 이용한 불규칙파 생성은 아래 과정을 따라 생성된다.

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left[-\frac{B}{\omega^4}\right] \quad \begin{cases} A = 173H_{1/3}^2 / T_1^4 \\ B = 691 / T_1^4 \end{cases} \quad (4-1)$$

이를 이용하여 각 파 성분 에서의 파진폭(wave amplitude)를 계산한다.

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{2} A_k^2 = \sum_{k=1}^N S_{\eta}(\omega_k) \Delta\omega_k \quad (4-2)$$

$$A_k = \sqrt{2S_{\eta}(\omega_k) \Delta\omega_k} \quad (4-3)$$

$\omega_k$  는 각 파 성분에서의 파 진동수(wave frequency)를 의미하고  $k$  는 1부터 파 성분의 개수인  $N$  까지 존재한다. 이를 바탕으로 생성되는 불규칙파는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \varepsilon_k) \quad (4-4)$$

여기서  $\varepsilon$  는 파 위상각(phase angle)로 0에서부터  $2\pi$  까지 랜덤 변수로 지정하였다. 일련의 과정으로 생성한 불규칙파와 제공된

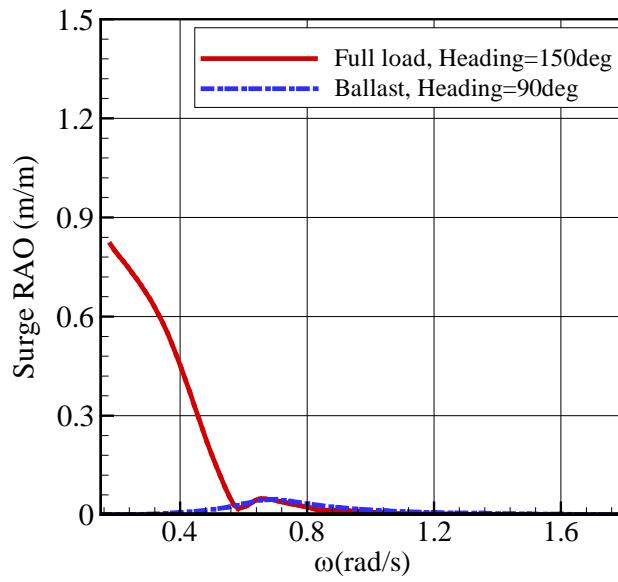
선박 운동 RAO를 바탕으로 하여 선박의 운동 히스토리를 생성할 수 있다. 마지막으로 선박의 운동 히스토리과 선박 운동 중심으로부터 탱크의 위치 정보를 이용하여 탱크의 운동 히스토리를 생성할 수 있다. 선박의 운동 히스토리는 다음과 같이 나타난다.

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^N H_k A_k \cos(\omega_{k,e} t + \varepsilon_k + \phi_k) \quad (4-5)$$

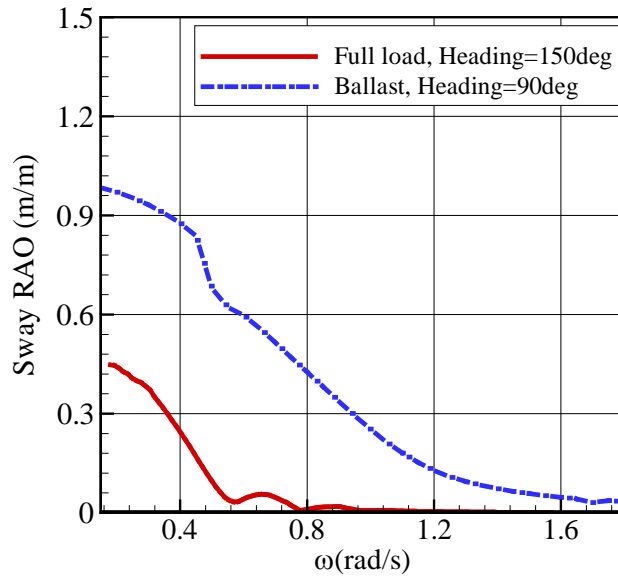
여기서  $H_k$  는 운동 RAO,  $\phi_k$  는 운동 위상각 (motion phase angle) 이다.  $\omega_{k,e}$  는 조우 진동수(encounter frequency)로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\omega_{k,e} = \omega_k - \frac{\omega_k^2 V}{g} \cos b \quad (4-6)$$

여기서  $b$  는 입사파의 입사각,  $g$  는 중력가속도,  $V$  는 선속을 의미한다. 선박 운동 RAO는 삼성 중공업에서 제공하였으며, RAO의 중심은 탱크 바닥 중심이다 (Fig. 4-2). 탱크운동 시계열은 모형 스케일 기준 5분 동안의 압력신호 안정화 기간을 포함하여 총 약 52.43분으로 생성하였다. 실제 압력신호 계측은 처음 5분간의 안정화 기간을 제외한 47.43분 즉, 실선 기준 5시간 동안 계측 되었다.

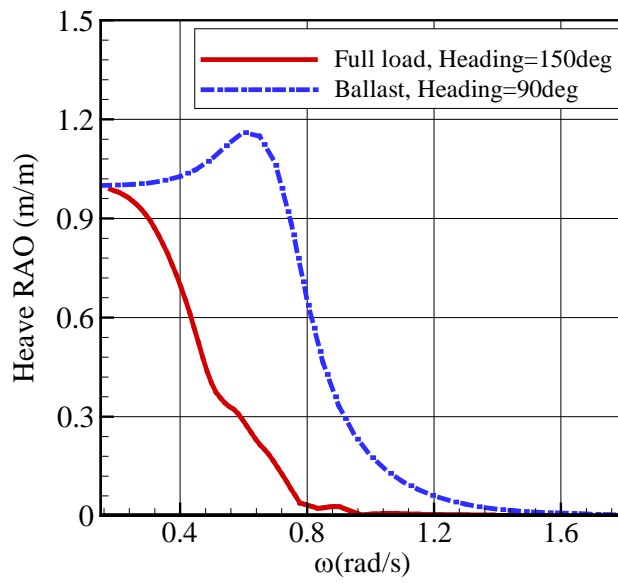


(a) Surge motion RAO

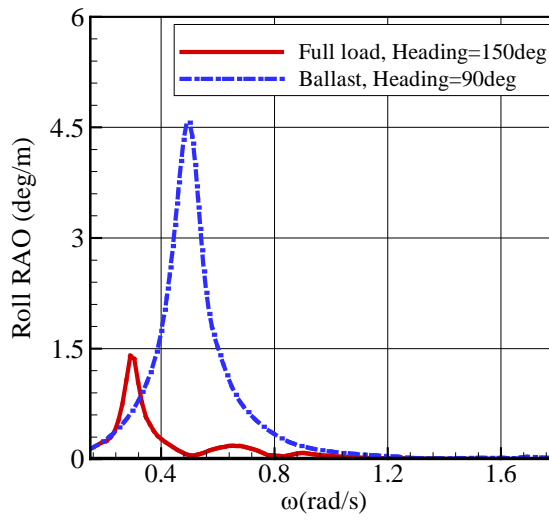


(b) Sway motion RAO

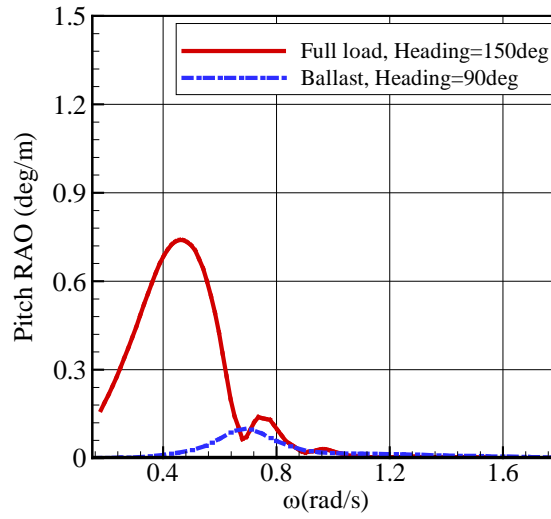




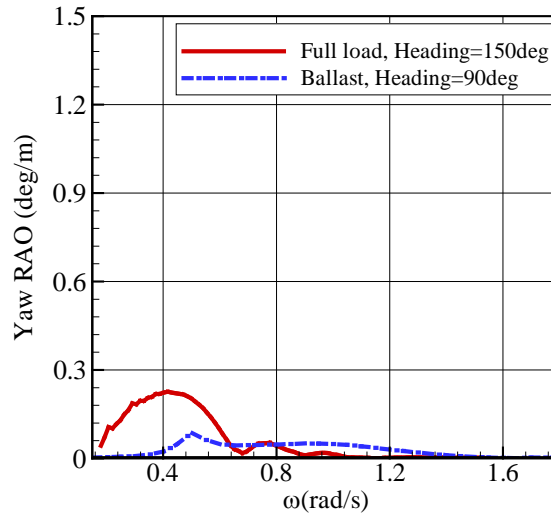
(c) Heave motion RAO



(d) Roll motion RAO



(e) Pitch motion RAO



(f) Yaw motion RAO

Fig. 4-2 Motion response of 138k LNG carrier,  $Fn=0.05$

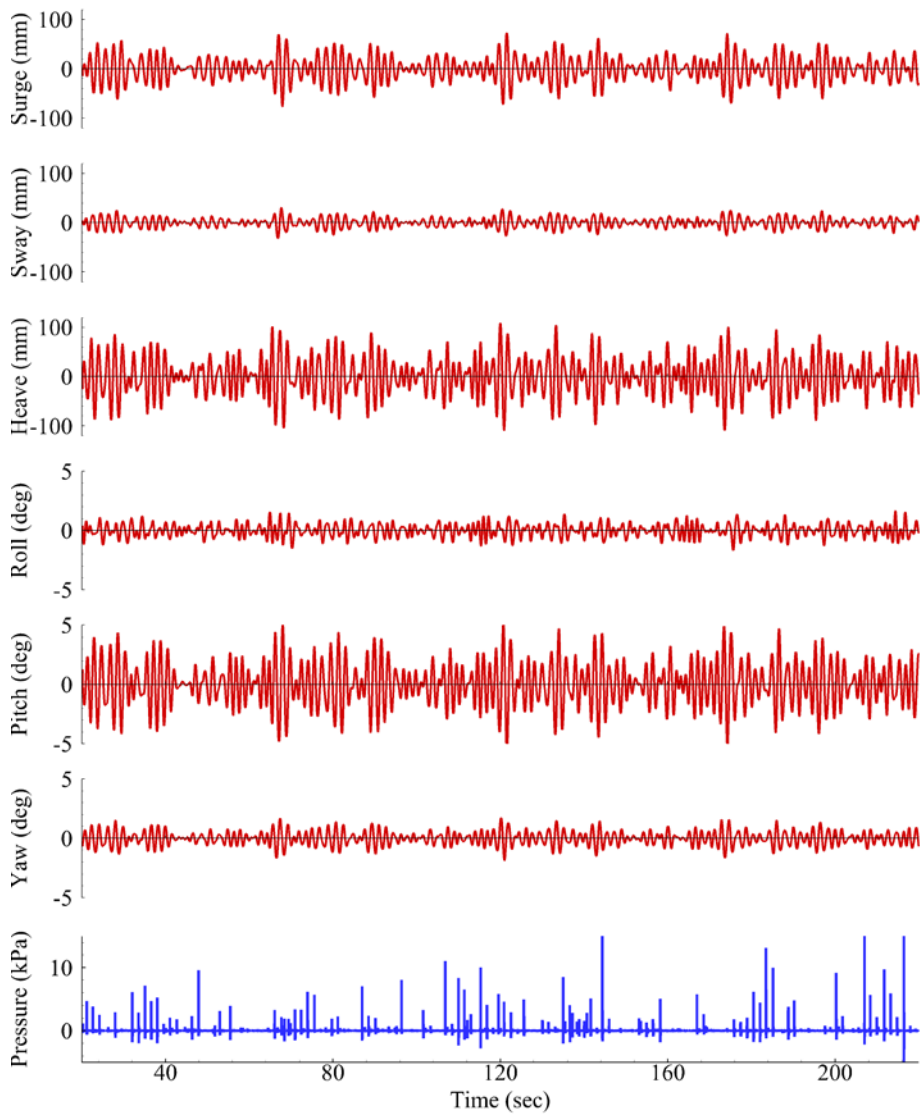


Fig. 4-3 Time history of 6dof tank motion in irregular sea condition and sloshing-induced dynamic pressure, model scale

## 4.2 모형 실험

모형실험은 서울대학교 슬로싱 실험동에서 수행하였다. 최근 서울대학교는 초대형 6자유도 운동 장비를 구축하여 현재 총 3기의 6자유도 운동 플랫폼 (1.5톤, 5톤, 10톤)을 보유하고 있으며, 축척탱크의 크기에 따라 유동적으로 운용하고 있다. 본 실험은 5톤급 플랫폼에서 수행하였다. 본 기관에서 보유하고 있는 운동 플랫폼은 스튜어트 (stewart) 타입의 장비이다. 스튜어트 플랫폼은 6개의 액추에이터 길이 변화를 통하여 플랫폼 상판의 6자유도 운동을 모사할 수 있어 슬로싱 실험과 관련된 많은 연구에서 널리 사용되고 있다.

본 기관에서 슬로싱 실험을 통해 데이터를 획득하는 과정을 요약한 모식도를 Fig. 4-4에 나타내었다. 스튜어트 플랫폼에 의해 탱크가 동요되면 내부유동에 의해 탱크 내벽에 큰 충격압력이 발생하고, 발생한 충격압력은 내벽에 설치된 압력센서를 통하여 계측된다. 계측된 신호는 커플러 (coupler)와 데이터 수집보드 (data acquisition system, DAQ)를 거쳐 디지털 신호로 변환되어 저장된다. 실험데이터의 용량이 크기 때문에 DAQ 시스템에 저장하지 않고 별도의 데이터 스토리지 (data storage) 서버에 원시 데이터를 저장하며, 데이터 유실을 방지하기 위해 별도의 2차 백업 시스템이 구축되어있다.

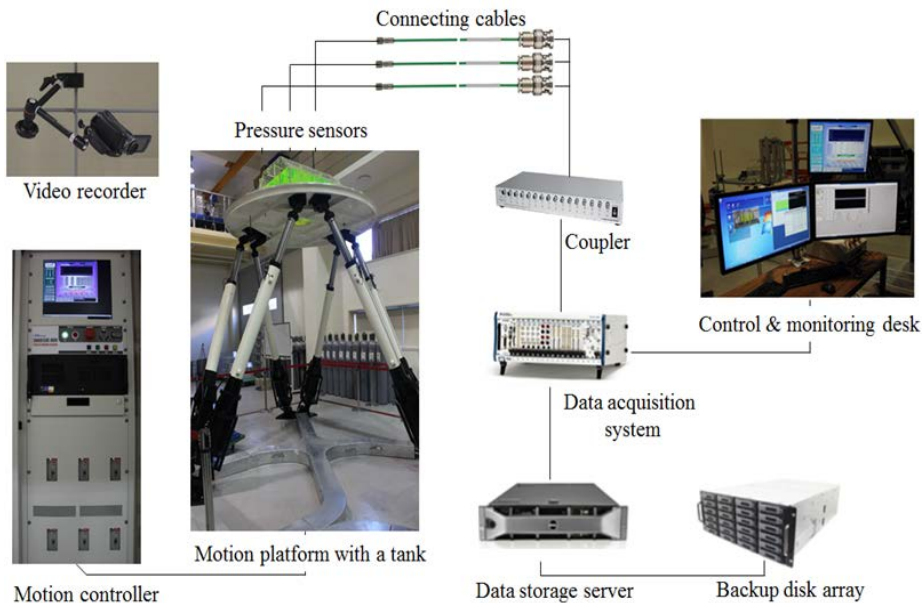


Fig. 4-4 Schematic diagram of measurement system for sloshing model test

#### 4.2.1 운동 플랫폼

실험에 사용된 6자유도 강제 동요기는 허용적재중량 5톤에 해당하는 스튜어트 플랫폼이다. 스튜어트 플랫폼은 6개의 액츄에이터 (actuator)의 길이를 변화시켜 상부판의 6자유도 운동을 모사할 수 있는 장비이다. 모형실험에 사용한 운동 플랫폼의 모습을 Fig. 4-5에 나타내었고, 장비의 성능은 Table 4-5에 정리하였다.



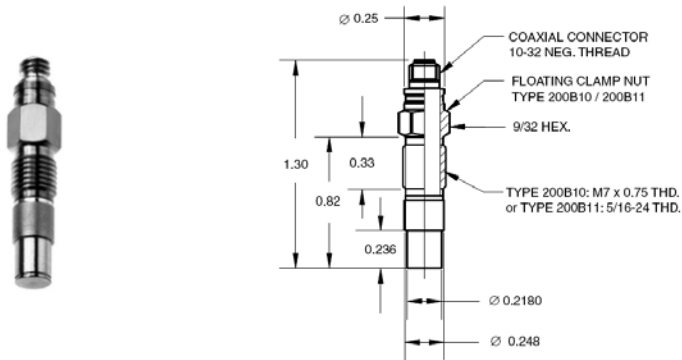
Fig. 4-5 Stewart type motion platform, 5ton capacity

Table 4-5 Performance of 6DOF motion platform (midsize – 5ton)

	Displacement	Velocity	Acceleration
Surge	± 1030 mm	2000 mm/s	0.6G
Sway	± 980 mm	1900 mm/s	0.6G
Heave	± 540 mm	1000 mm/s	0.6G
Roll	± 35.0 deg	83.0 deg/s	200 deg/s <sup>2</sup>
Pitch	± 35.0 deg	83.0 deg/s	200 deg/s <sup>2</sup>
Yaw	± 65.0 deg	170.0 deg/s	300 deg/s <sup>2</sup>
운영하중	2500 kgf	Power requirement	3상 440VAC, 60Hz
순시최대하중	5000 kgf	Consumption	평균 50kW Peak 100kW

#### 4.2.2 압력센서

실험에 사용한 압력 센서는 KISTLER 사의 211B5 이다. 211B5 센서는 Integrated Circuit Piezoelectric (ICP) 센서로 앰프를 사용할 필요가 없다. 211B5의 최대 계측 가능 압력은 6.89bar 이며 5V의 전기 신호로 이를 출력한다. 211B5의 측정 직경은 5.54mm이다. 아래의 Fig. 4-6에 본 실험에 사용한 211B5센서의 모습과 치수를 나타내었으며 센서의 특징을 정리하여 Table 4-6에 나타내었다.



(a) Photo of 211B5 (b) Specific dimension (inch)

Fig. 4-6 Configuration of 211B5 sensor (KISTLER)

Table 4-6 Technical data of 211B5 sensor

Type	Value
Pressure Range (bar)	6.89
Maximum Pressure without damage (bar)	34.47
Sensitivity nom (mV/bar)	725.68
Threshold (psims)	0.001
Amplitude Non-linearity zero based BFSL	1
Hysteresis (%)	1
Resonant Frequency nom (kHz)	300
Low Frequency Response -5% Point (Hz)	0.025
High Frequency Response +5% Point (kHz)	50
Temperature Range Operating (°F)	-65 ~ 200
Bias nom. (VDC)	11
Impedance max. ( $\Omega$ )	100



압력센서는 Fig. 4-8와 같이 큰 슬로싱 충격이 나타날 것으로 예측되는 탱크의 각 모서리 부근에 패널 형태로 설치하였다 (P01~P24). 슬로싱 충격은 국부적으로 아주 큰 압력값을 보이는 특징이 있어 압력센서를 격자형으로 조밀하게 배치하여 실험을 하는 것이 일반적이며, 선급들도 이 같은 방법을 권고하고 있다. 본 실험에서 설치한 24개의 압력센서 패널의 채널 번호를 아래의 그림에 나타내었다. 클러스터에 설치된 압력센서들의 중심간 거리는 모델기준 10mm이며 탱크 모서리로부터 가장 인접한 센서 중심간 거리는 8.5mm 이다 (Fig. 4-7). 각 패널의 압력센서 번호는 Fig. 4-10 Specific channel number of each cluster panel에 나타내었다.

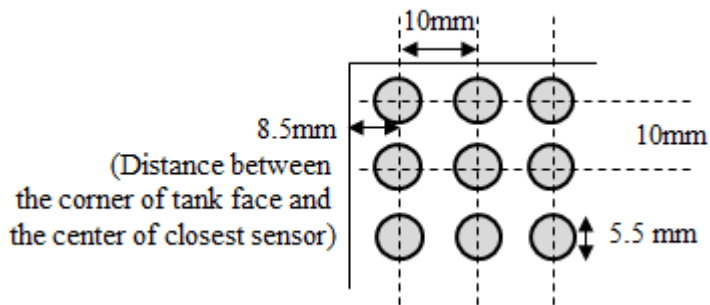


Fig. 4-7 Arrangement of pressure sensor at cluster panel

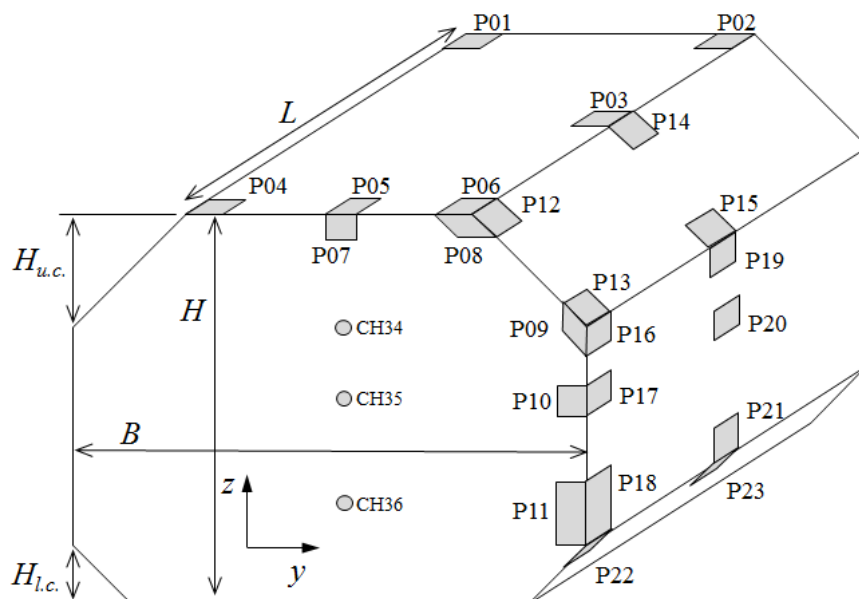


Fig. 4-8 Position of cluster sensor panels

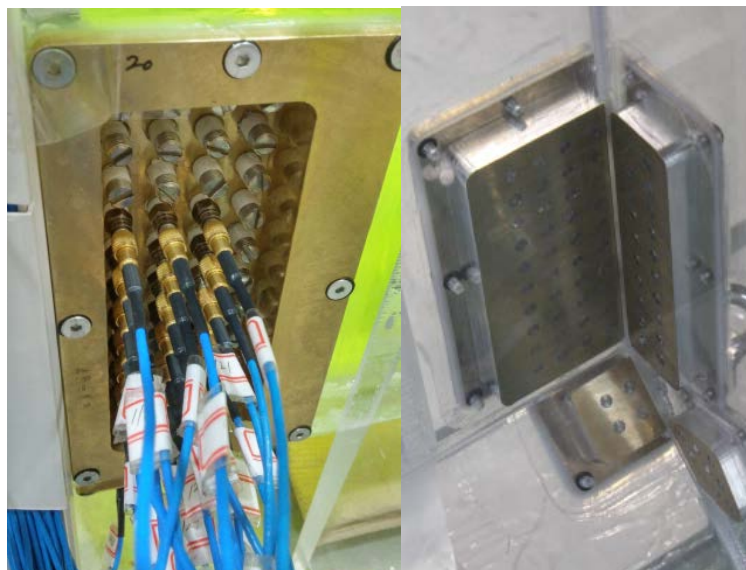
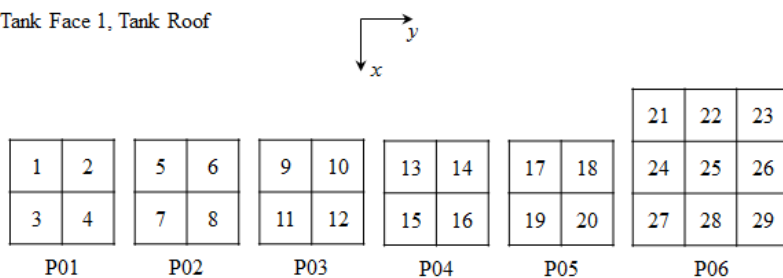
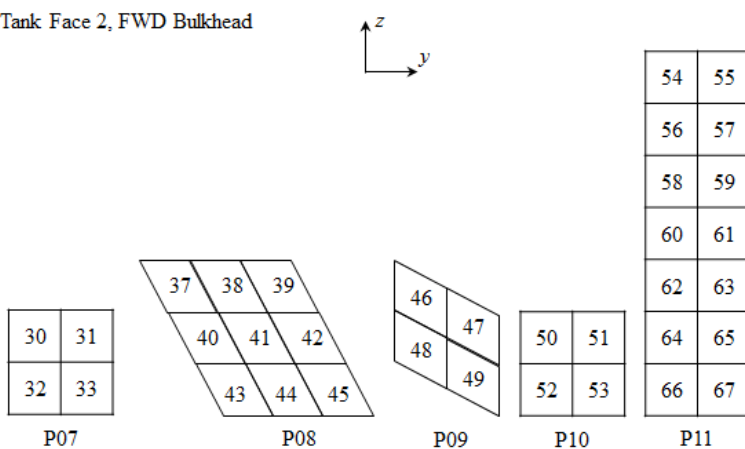


Fig. 4-9 Installation of sensor and cable

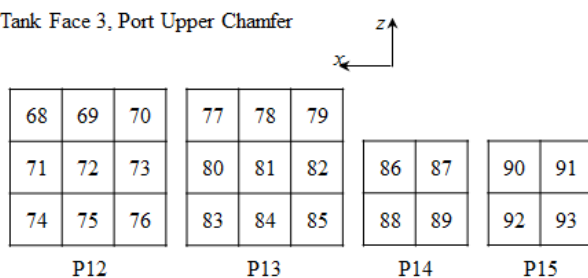
Tank Face 1, Tank Roof



Tank Face 2, FWD Bulkhead



Tank Face 3, Port Upper Chamfer



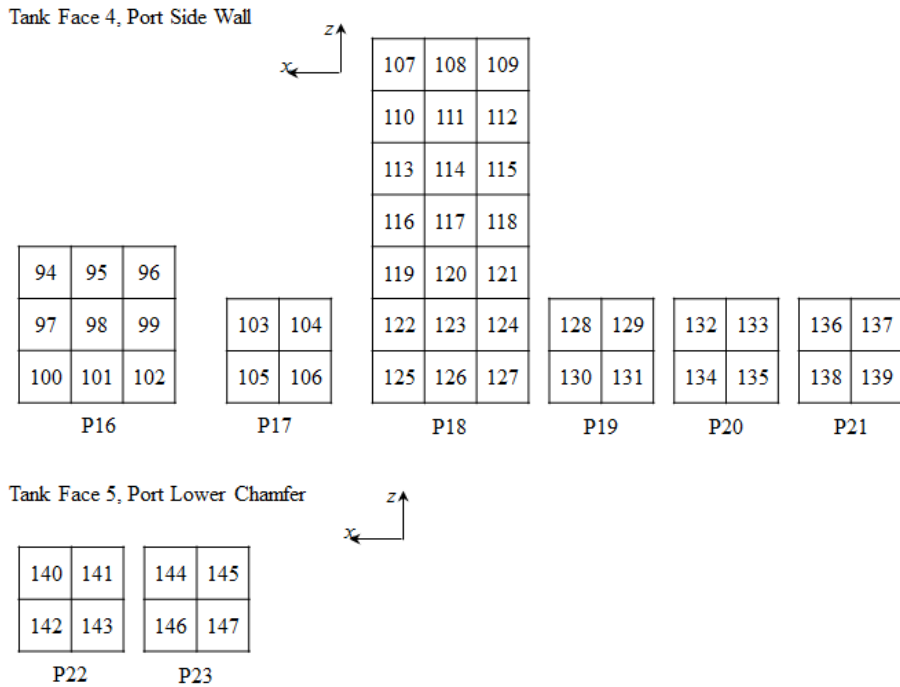


Fig. 4-10 Specific channel number of each cluster panel

### 4.2.3 DAQ 시스템

실험 데이터 취득을 위하여 National Instruments 사의 PXI-4495 장비를 이용하였다. PXI-4495는 동시 16개 채널에 대하여 최고 204.8kS/s로 샘플링 (sampling)이 가능하며, 입력 가능한 전압(voltage)의 범위는 -10~+10V 이다. DC 커플 된 아날로그 정보를 입력 받을 수 있으며 주파수 중복방지 필터 (anti-aliasing filter)가 장착되어 있다. Fig. 4-11에 PXI-4495와 랙 (rack)을 결합한 모습을 나타내었으며 Table 4-7에 장비의 특성에 대하여 정리하였다. 실험 데이터 변환 및 저장은 National Instruments 사의

Labview Professional 2009 프로그램을 사용하였다.



Fig. 4-11 Data acquisition device, PXI-4995 (National Instruments)

Table 4-7 Technical data of PXI-4495

Bus	PXI, PXI Express
Input Resolution(bits)	24
Dynamic Range(dB)	114
Sampling Rate per Channel	204.8kS/s
Analog Inputs	16
Input Range	-10~+10V
Gain Settings	0 and 20 dB
Coupling	DC
TEDS Supports	OK

211B5센서는 bias voltage가 11V로 DAQ 장치가 허용하는

전압범위를 벗어난다. 커플러(coupler)는 압력센서에 전원을 공급하는 역할과 더불어 bias voltage를 0으로 조정하는 역할을 한다. Fig. 4-12는 실험에 사용된 16 채널용 커플러 장비를 보여주고 있다. Coupler는 KISTLER사에서 생산된 제품을 이용하였다. Table 4-8에 coupler 장비의 특성에 대하여 나타내었다.



Fig. 4-12 Piezoelectric sensor power supply/coupler (KISTLER)

Table 4-8 Technical data of coupler

Type		Value
Channel		16
Sensor Excitation	Voltage (VDC)	24
	Constant current (mA)	2
	Accuracy (%)	-1 ~ +1
	Non-linearity (%)	-1 ~ +1
Frequency response (Hz)		0.05~ 50000
Output	Voltage (V)	-10 ~ +10
	Current (mA)	5
Connector		BNC cable

## 4.3 실험시간 민감도 연구

### 4.3.1 장시간 모형실험 수행

통상적으로 불규칙운동에 대한 실험의 경우 실험수행시간으로 실선기준 5시간을 최소실험시간으로 공통적으로 권장하고 있지만 권장시간선정의 정확한 근거가 제시된 바가 없다 (ABS, 2009; BV, 2010; DNV-GL, 2006; LR, 2009). Kuo et al. (2009)는 한가지 해상상태에 대하여 240시간의 장시간 실험을 통해 실험수행시간에 따른 통계해석결과의 불확실성을 언급한바 있으나 해상상태, 실험조건 등의 정보를 구체적으로 밝히지는 않았다. Fillon et al. (2011)은 480시간에 해당하는 장시간 실험을 수행하였으나 낮은 적재수심 조건 한가지만을 고려하였으며 결과자체보다는 분포함수의 변화에 따른 결과의 차이에 초점을 맞춘 연구를 하였다.

본 과제에서는 불규칙운동 실험결과에 실험수행시간이 미치는 영향을 알아보기 위하여 동일실험조건에 대하여 반복실험을 수행하였다. Table 4-9에 실험조건을 정리하였다. 모형실험은 1:50 축척비의 탱크에서 수행하였으며 적재조건은 0.95H, 0.20H의 두가지를 고려하였다. 각 적재 조건 별로 하나의 해상상태를 고려하여 실선기준 5시간 실험을 20회 반복하여 한가지 조건에 대하여 총 100시간에 해당하는 실험 데이터를 획득하였다. 반복 실험 시, 매 실험마다 스펙트럼 이산화를 통한

불규칙 파 생성에서 고려하는 파 위상각을 랜덤으로 설정하였으므로 각 실험에 상용된 탱크의 운동 시계열은 동일하지 않다.

Table 4-9 Test condition of long-time simulation

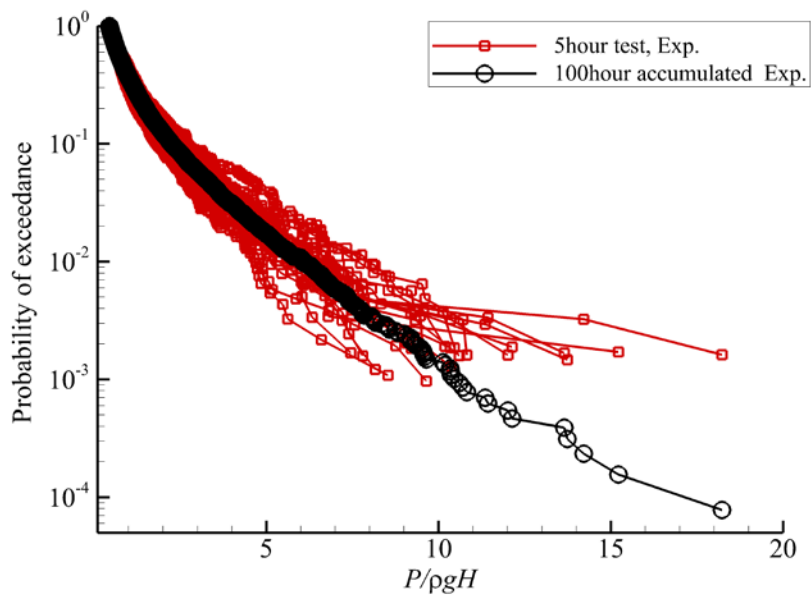
Case	Filling	Heading angle	Sea condition	Test time	Phase seed
Case 1	0.95H	150deg	Tz = 9.5s Hs = 12.5m	5hrs x 20	random
Case 2	0.20H	90deg	Tz = 7.5s Hs = 7.5m	5hrs x 20	random

#### 4.3.2 실험결과의 수렴성 검토

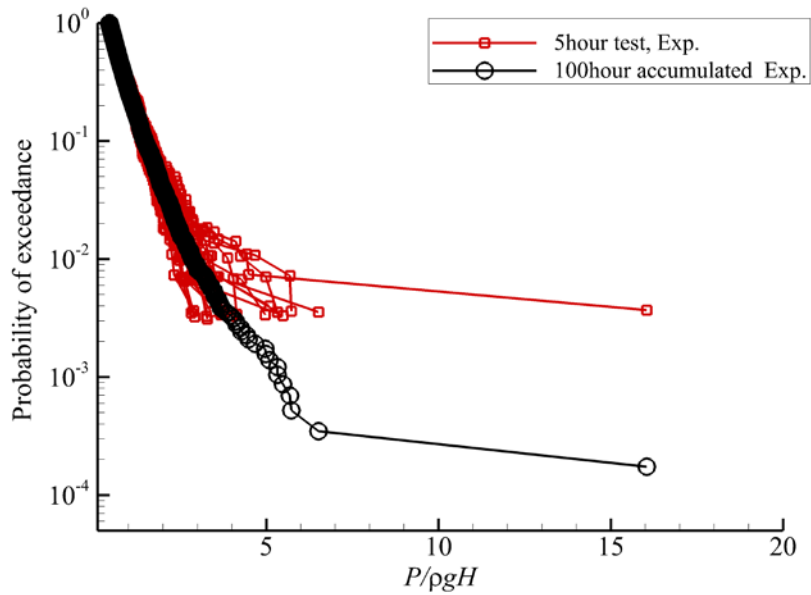
각 케이스마다 수행된 20회 반복실험에서 나타나는 슬로싱 충격압력의 초과확률 분포도를 Fig. 4-13~Fig. 4-14에 나타내었다. 실험값은 Weibull 분포함수를 사용하여 근사하였다. 각각의 5시간 실험을 통해 도출한 슬로싱 충격압의 확률분포는 상당한 편차를 보였다. 편차의 정도는 적재 깊이 및 충격위치에 따라 다르며, 큰 슬로싱이 나타나는 위치에서 더욱 큰 편차를 보였다. 대부분의 케이스에서 20회 반복실험의 최소값과 최대값을 비교하면 초과확률  $10^{-4}$ 에 해당하는 압력값 기준 약 2배 이상 차이를 보였다. 또한 지수함수의 형태를 따르는 확률분포의 특성상 더욱 낮은 확률에서의 유의 압력값을 비교할 수록 그 차이가 커졌다.



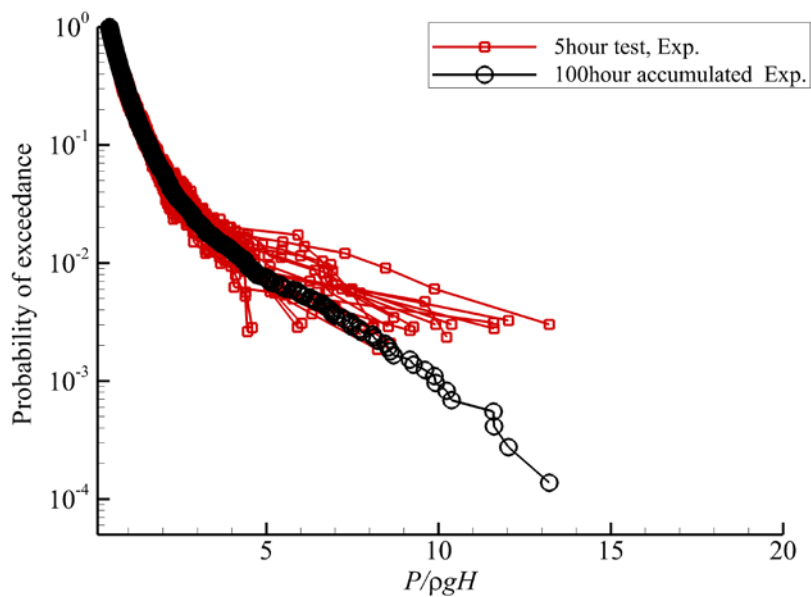
본 결과를 미루어 볼 때 기존의 각 선급과 실험기관에서 권장하고 있는 5시간의 실험결과를 통해 3시간에 해당하는 최대 슬로싱 하중을 추정하는 경우 그 결과에는 많은 불확실성이 있음을 알 수 있다.



(a) P06, tank roof

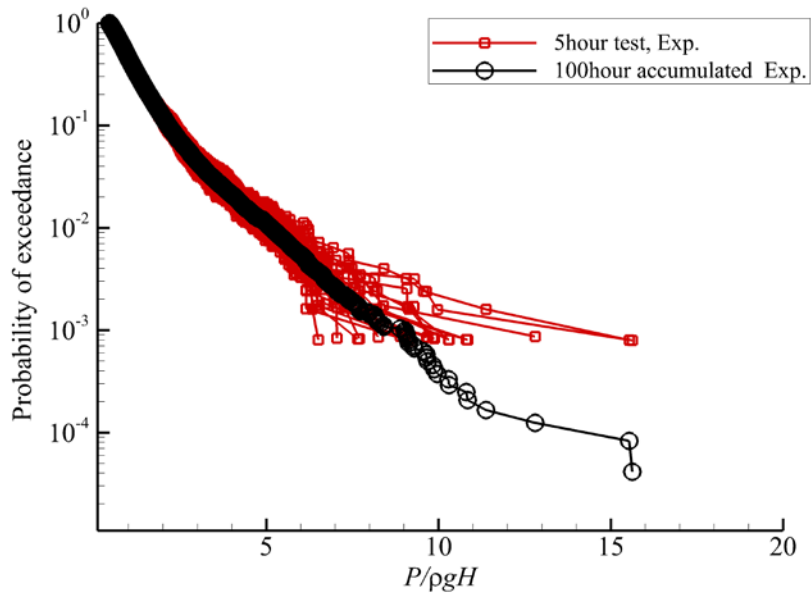


(b) P08, forward bulkhead

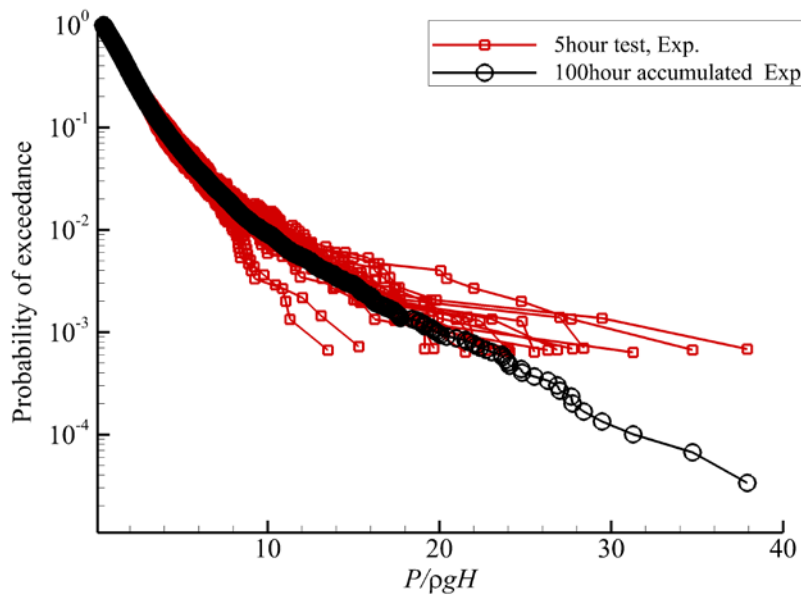


(c) P12, port upper chamfer

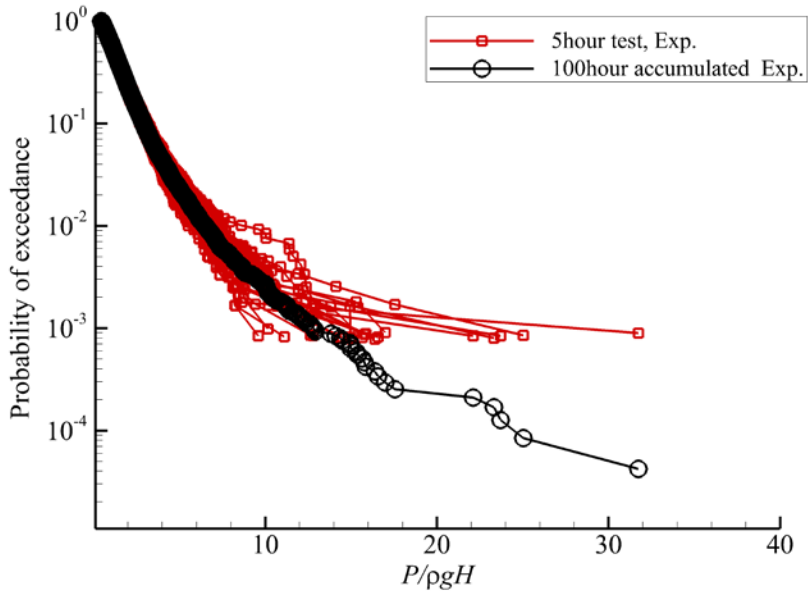
Fig. 4-13 Exceedance probability of sampled sloshing peak for repeat test, filling=0.95H, heading=150deg,  $T_z=9.5s$ ,  $H_s=12.5m$



(a) P11, forward bulkhead



(b) P18, side wall



(c) P21 side wall

Fig. 4-14 Exceedance probability of sampled sloshing peak for repeat test, filling=0.20H, heading=90deg, Tz=7.5s, Hs=7.5m

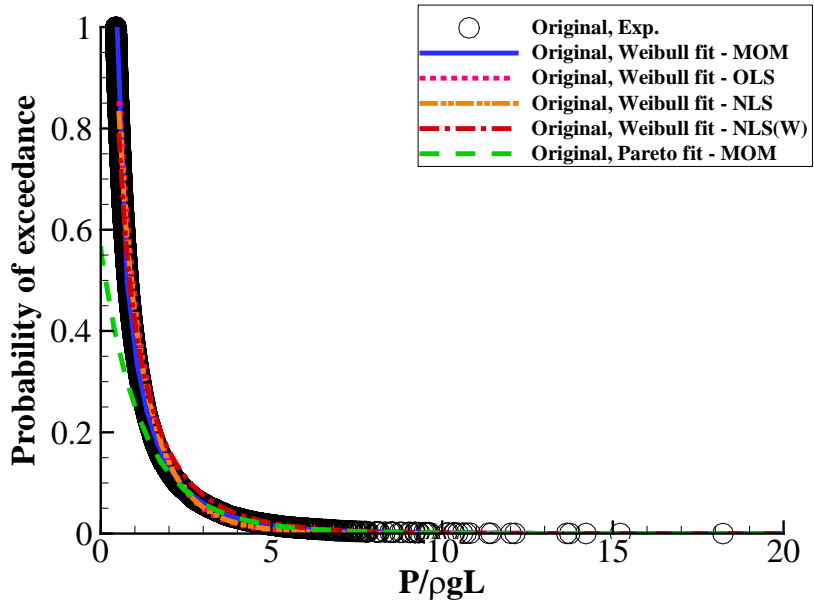
### 4.3.3 함수근사 이상치의 방법론 검토

본 연구에서는 함수근사 이상치 분석 절차에서 실험데이터의 Weibull 분포함수 근사를 위해 비선형 회귀분석법을 도입하였다.

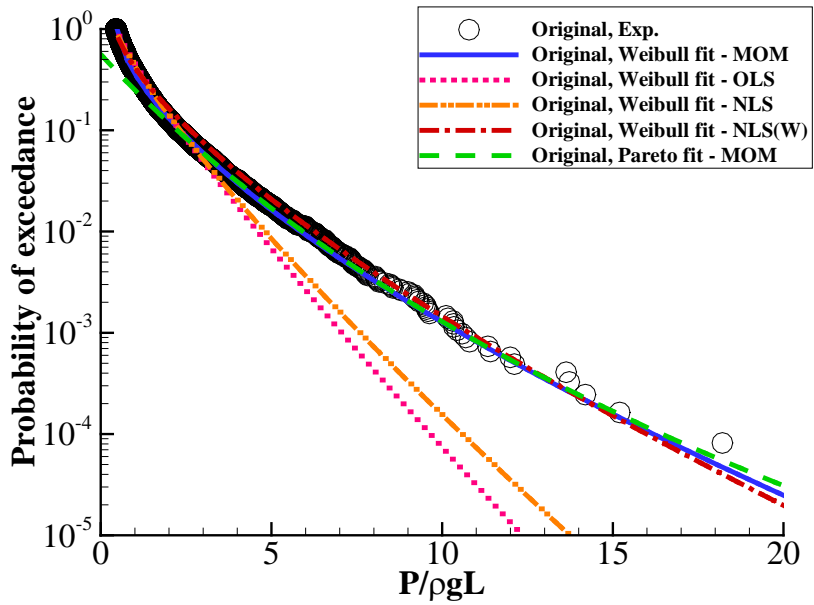
0이에 우선 슬로싱 문제의 적용에 있어 비선형 회귀분석법이 적합한지에 대한 확인을 하였다. Fig. 4-15에 적재조건 0.95H에 대하여 실선기준 100시간 모형실험을 통해 수집한 슬로싱 충격하중의 확률분포를 Weibull 분포함수에 근사함에 있어 각기 다른 4가지 접근법을 이용한 결과를 비교하여 나타내었다. Weibull

분포함수 근사에 사용한 4가지 방법은 모멘트법 (이하 MOM), 선형 회귀분석 (이하 OLS), 비선형 회귀분석 (이하 NLS), 잔차에 가중치를 부여한 비선형 회귀분석 (이하 NLS(W))의 네가지 방법이다.

잔차의 계산시 가중치를 부여하지 않는 OLS 방법과 NLS 방법의 경우 빈번하게 발생하는 관측값에 대한 근사에 초점이 맞추어져 슬로싱 하중의 확률분포 예측에서 큰 비중을 차지하는 낮은 초과확률값에서의 슬로싱 하중 분포를 정확하게 예측하지 못하는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이에 반해 잔차에 가중치를 부여한 NLS(W) 방법의 경우 본래의 의도에 따라 낮은 확률에서의 실험값을 잘 따라가는 경향을 확인할 수 있다. 보편적으로 사용되는 MOM 방법과 NLS(W)방법의 경우 모두 실험에서 나타난 슬로싱 충격압력의 확률분포를 Weibull 분포함수에 근사하기에 적합한 것을 알 수 있다.



(a) Original plot



(b) Log-scaled plot

Fig. 4-15 Comparison of analysis results based on various fitting methods, filling=0.95H, P06, tank roof

압력 시계열에 대하여 슬로싱 충격신호 표본을 추출하는 방법과 더불어, 슬로싱 충격의 국부성을 고려하여 특정 센서 패넬에 위치한 센서들 전체를 기준으로 하여 표본을 수집하는 방법을 설명하였다. 이렇게 특정 지역에 설치한 다채널 압력 신호를 바탕으로 함수근사 이상치를 분석할 경우 이상치 분석을 수행하는 시점에 따라 최종적인 해석결과가 달라지는 문제가 발생한다. 이상치 해석을 수행하는 시점에 따라 슬로싱 충격압력의 통계해석 흐름도는 아래와 같이 두 가지로 구분 할 수 있다 (Fig. 4-16).

첫번째 방법은 각각의 압력센서로부터 추출한 슬로싱 충격 표본값들을 바탕으로 ‘maximum per event’ 방법을 사용하여 다채널 기준 대표 슬로싱 충격 표본들을 선별한 후 이상치 분석을 적용, 통계해석하는 방법이다. 이 방법은 다채널 기준으로 수집된 압력값들의 확률분포에 초점을 맞추어 이상치를 탐지, 처리 하는 방식으로, 개별 센서로부터의 슬로싱 충격압력의 확률분포 특성을 고려하지 않는 단점이 있다.

두 번째 방법은 각각의 압력센서로부터 추출한 슬로싱 충격 표본값들을 바탕으로 이상치 분석을 수행한 후, 다채널 기준 슬로싱 충격 표본들을 정리, 통계해석하는 방법이다. 이 방법은 단일채널의 슬로싱 충격 표본에 대한 이상치 분석 시 적용한 수정된 관측값을 그대로 가져오므로 이상치로 판단된 슬로싱 충격에 대하여 단일 채널 표본과 다채널 표본에서 동일하게

압력값을 조정한다는 점에서 비교적 일관된 분석방법이라 할 수 있다. 반면 다채널 표본 기준으로 검토 시 이상치로 탐지되지 않는 수준의 관측값이 개별 채널기준시 이상치로 탐지되어 불필요한 데이터 수정을 거치게 될 가능성이 있다는 단점이 있다.

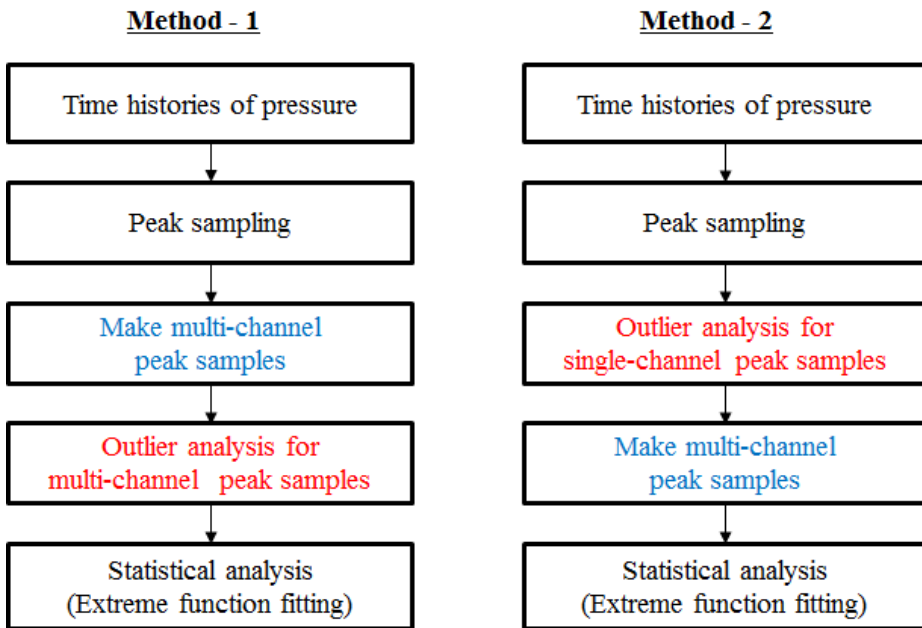


Fig. 4-16 Comparison of flowchart of two different fitting-outlier analysis method

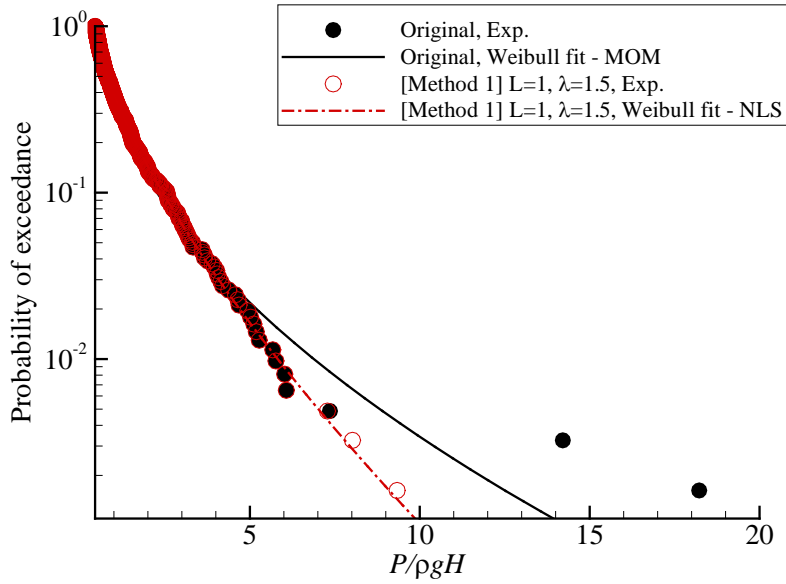
두 가지 각기 다른 이상치 분석방법을 적용한 결과를 슬로싱 충격압력의 초과확률 분포도를 통해 Fig. 4-17에 나타내었다. 여기서 두가지 이상치 분석방법이란 앞서 설명한 것과 같이 다중 채널 표본 구축 이후 이상치 분석을 수행하는 method-1과 단일 채널 표본들에 대하여 이상치 분석을 수행한 후



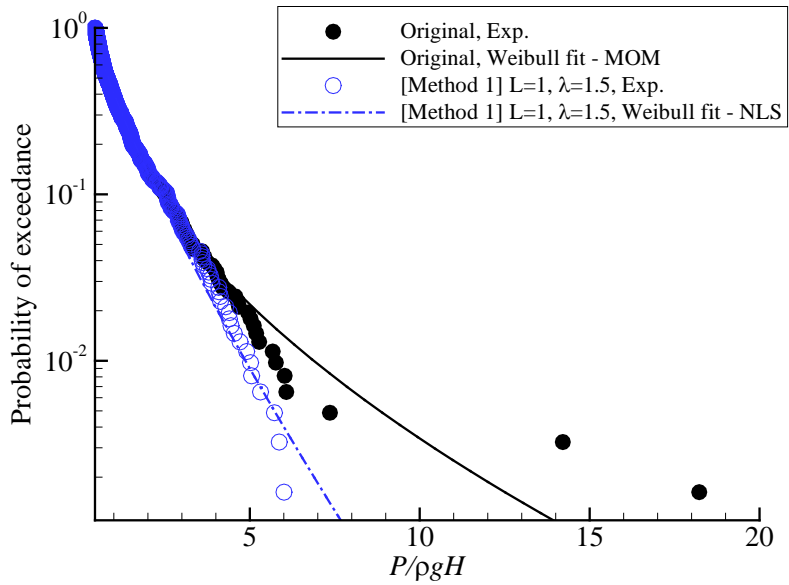
다중 채널 표본을 구축하는 method-2이다. 그래프에서 x축은 추출된 슬로싱 충격 표본들의 압력 피크치, y축은 초과확률을 의미한다. 초과확률 분포도에서 심볼은 실험으로부터 얻은 표본들의 수치이며, 이를 Weibull 분포함수에 근사시킨 것을 선으로 나타내었다.

이상치 해석을 수행하지 않은 원시 데이터의 결과를 살펴보면 전체 경향에서 크게 벗어나는 과도하게 큰 압력값을 보이는 두 관측치 (무차원화한 압력값 기준 약 14, 18)의 존재로 Weibull 분포함수 근사치 또한 전반적인 관측치가 나타내는 확률분포의 경향과는 많이 벗어나 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 전체적인 경향에서 크게 벗어나는 의심스러운 관측값을 통계적인 방법에 근거하여 적정 수준으로 수정하는 것이 함수근사 이상치를 적용하는 이유이다.

첫번째 방법 (method-1)의 경우 이상치 해석의 초기 목적에 부합하도록 대부분의 관측값들은 원시데이터의 값을 그대로 유지하고 있으며, 전체 경향에 반하는 일부 관측값만이 이상치로 탐지, 조정된 것을 확인 할 수 있다. 반면 두번째 방법 (method-2)의 경우 첫번째 방법에 비하여 이상치로 탐지된 관측값의 수가 상대적으로 많으며, 다중 채널 표본 기준시 전반적인 경향을 잘 따르는 관측값들도 이상치로 탐지, 수치가 조정된 것을 볼 수 있다.



(a) Method-1: Make multi-channel data before outlier analysis



(b) Method-2: Make multi-channel data after outlier analysis

Fig. 4-17 Comparison of probability of exceedance when applying different outlier handling method, filling=0.95H, Run No.18, P06

다중채널 표본의 생성에 사용된 단일채널 각각에 대한 이상치 해석 결과를 초과확률 분포도로 정리하여 Fig. 4-18에 나타내었다. 그래프를 통해 확인 할 수 있듯이 각 단일 채널에서의 이상치 해석은 초기의 목적에 부합도록 전체적인 경향을 벗어나는 일부 관측값들에 대해서만이 이상치로 탐지되어 데이터 수정이 이루어졌다. 하지만 이를 바탕으로 다중 채널 슬로싱 충격 표본을 생성할 경우 이상치 해석을 수행하지 않은 원시데이터의 전반적 경향과 다소 차이를 보였다. 이러한 결과는 이상치 분석을 수행하는 초기 목적에서 벗어나 과도한 데이터 왜곡이 나타난 것으로 판단할 수 있어, 다중 채널 표본에 대한 이상치 해석의 경우 method-1의 방법을 적용하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

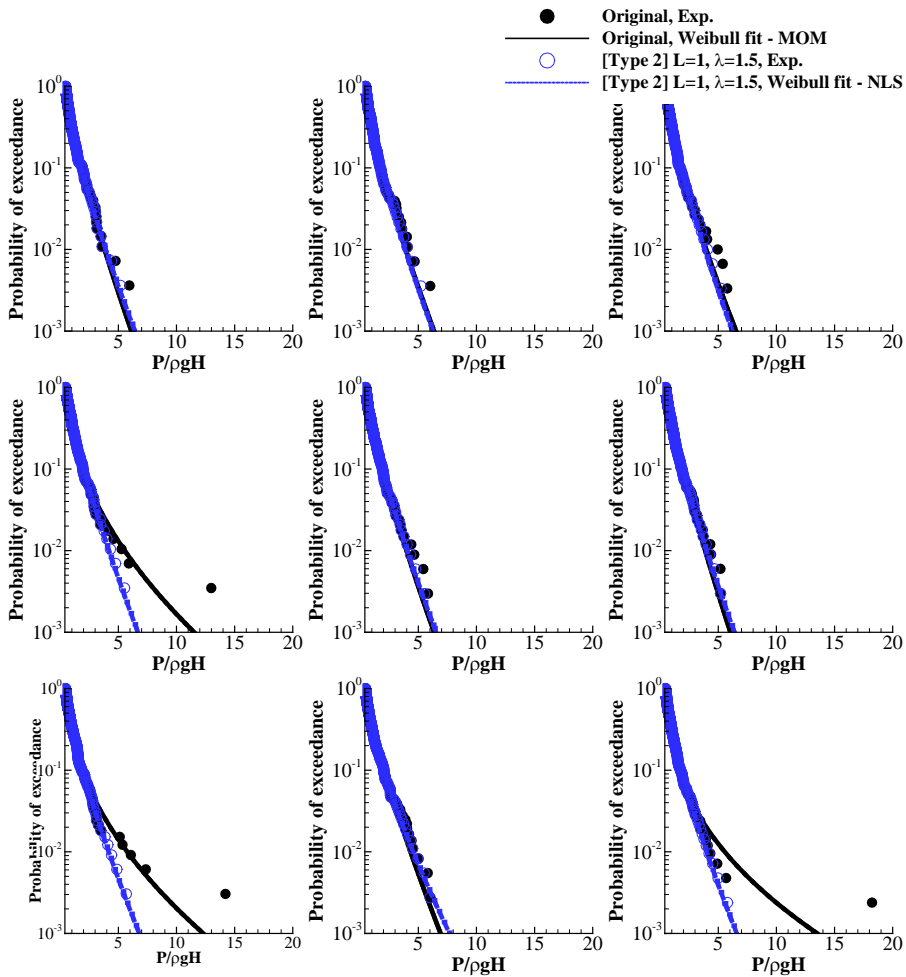
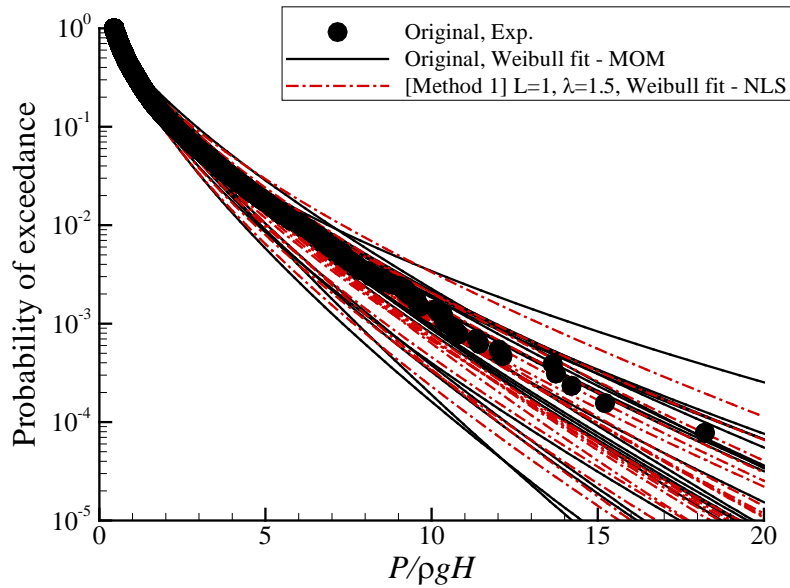


Fig. 4-18 Comparison of probability of exceedance distributions  
according to outlier analysis method, channels on P06, filling=0.95H

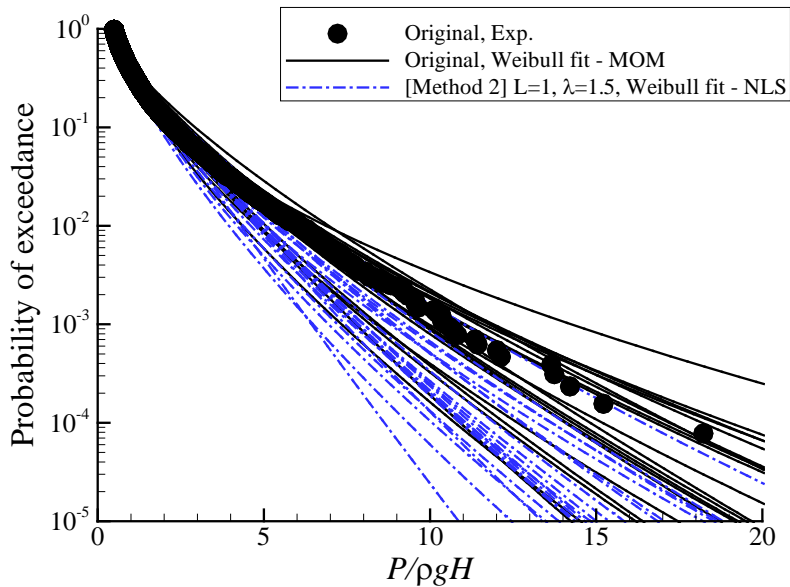
실험시간 민감도 연구에서 수행하였던 장시간 실험데이터를 바탕으로 이상치 해석의 효용성을 살펴보았다. Fig. 4-19는 동일한 해상상태에서 수행한 20회의 반복실험결과를 초과확률 분포도로 나타낸 것이다. 그래프에서 검정색 심볼은 20회의 5시간 반복실험으로부터 얻은 100시간 실험데이터로부터의 슬로싱 충격

표본들을 취합한 것이며, 실선으로 나타낸 것은 이상치 분석을 수행하지 않은 5시간 개별 실험데이터의 Weibull 함수 근사값이며, 점선으로 나타낸 것은 이상치 분석수행한 5시간 단일 실험 데이터의 Weibull 분포함수 근사값이다.

우선 Method-1을 이용할 경우 이상치 해석을 수행함에 따라 5시간 실험결과들간의 차이가 원시 데이터를 그대로 사용한 결과에 비하여 다소 감소한 것을 확인할 수 있다. 그러나 원시데이터를 그대로 사용한 경우보다 장시간 실험결과에 더욱 근접한 결과를 주는지에 대한 판단을 위해서는 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다. 반면 Method-2의 경우 이상치 분석을 수행함에 따라 원시데이터의 결과에 비하여 전체적으로 좌편향된 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 전반적으로 확률분포도의 경향이 좌편향 됨에 따라 상대적으로 수렴된 결과라 할 수 있는 100시간 실험 결과와의 차이도 전반적으로 커지게되어 이상치 분석의 본 목적인 수렴도 향상의 취지에 부합하지 않는 결과를 주는 것으로 보인다. 앞선 결과들로 미루어보아 함수근사 이상치의 해석은 1번 방법으로 수행하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있으며, 이후의 분석에 있어서는 1번의 방법만을 다루도록 하겠다.



(a) Method 1 – Make multi-channel data after outlier analysis



(b) Method 2 – Make multi-channel data before outlier analysis

Fig. 4-19 Comparison of probability of exceedance when applying different outlier handling method, accumulate 20 repeat test results, filling=0.95H, P06

이상치 해석이 모형실험결과의 수렴성을 향상시키는데  
 대한 판단을 위하여 추가적인 분석을 수행하였다. 이때 이상치  
 해석시 이상치를 탐지하는 기준을 다양하게 변화시켜가며  
 해석결과를 살펴보았다. 이상치를 탐지하는 기준은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} &\text{measurement } P_i \text{ is a outlier} \\ &\text{if } r_i > Q_3 + \lambda \cdot IQR \text{ or } r_i < Q_1 - \lambda \cdot IQR \end{aligned} \quad (4-7)$$

각각의 파라미터들은 앞선 ‘3.4.6 이상치의 정의’ 분에서 이미  
 정의하였었으며, 고전적으로 관측치의 확률분포가 정규분포를  
 따르는 경우  $\lambda$  는 1.5로 정의된다 (Tukey, 1969).  $\lambda$  가 클수록  
 이상치로 판별하는 기준이 관대해 진다고 볼 수 있다. 본  
 연구에서는  $\lambda$  를 0.5~3.0까지 0.5단위로 변화시켜가며 해석결과를  
 살펴보았다.

Fig. 4-20은 20회 반복실험에서 각각의 Weibull 분포함수  
 근사를 통해 추정한 분포함수의 형상을 결정하는 세 가지 모수를  
 상자 그림 (box plot)으로 나타낸 것이다. 상자그림에서 가장  
 상단과 하단에 위치한 경계선은 각각 20회의 반복실험에서  
 나타나는 최대값과 최소값을 의미하며 상자의 상단면과 하단면은  
 각각 25분위수와 75분위수를 의미한다. 또한 박스 내에 위치한  
 경계선은 중앙값을 뜻한다

우선 위치모수의 비교시 이상치 분석을 수행하지 않은 원시

데이터의 결과의 경우 20회 반복실험간 최대 약 2배의 차이를 보였다. 반면 이상치 해석을 수행할 경우 20회의 반복실험결과들이 거의 유사한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 이상치 해석의 한 단계인 비선형 회귀분석을 이용한 분포함수 근사법이 표본의 최소값인 임계 압력값에 상당히 근사한 추정값을 도출하기 때문이다. 또한 이상치 해석을 수행한 결과가 100시간 수렴값에 더욱 근접한 결과를 주는 것으로 보인다.  $\lambda$ 의 변화에 따른 해석결과차이는 위치모수의 경우 거의 확인할 수 없었다.

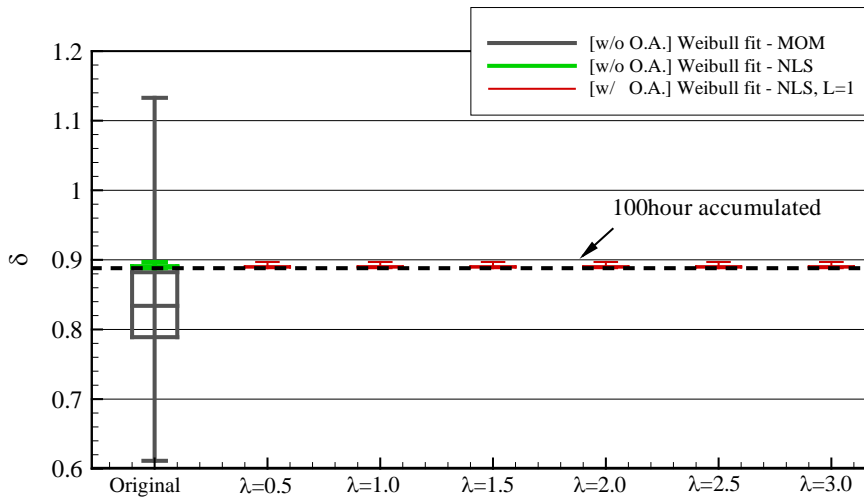


Fig. 4-20 Box-plot showing the distribution of location parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06

척도모수의 경우 이상치 분석을 수행하지 않은 원시 데이터에서 반복실험간 최대 약 2.5배의 차이를 보였으며 이상치 해석을 수행할 경우 이 차이를 약 1.5배 수준으로 감소시킬 수



있었다 (Fig. 4-21). 척도모수 또한  $\lambda$  의 변화에 따라 민감하게 달라지지 않는 것을 알 수 있다. 그래프에서 박스의 길이가 의미하는 제 1사분위수와 제 3사분위수 사이의 거리 또한 이상치 분석 수행을 통해 좁힐 수 있었으나 그 효과가 크지는 않았다. 또한 실험간 편차가 개선될 뿐만 아니라 개선된 결과가 100시간 수렴값에 더욱 근접하는 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

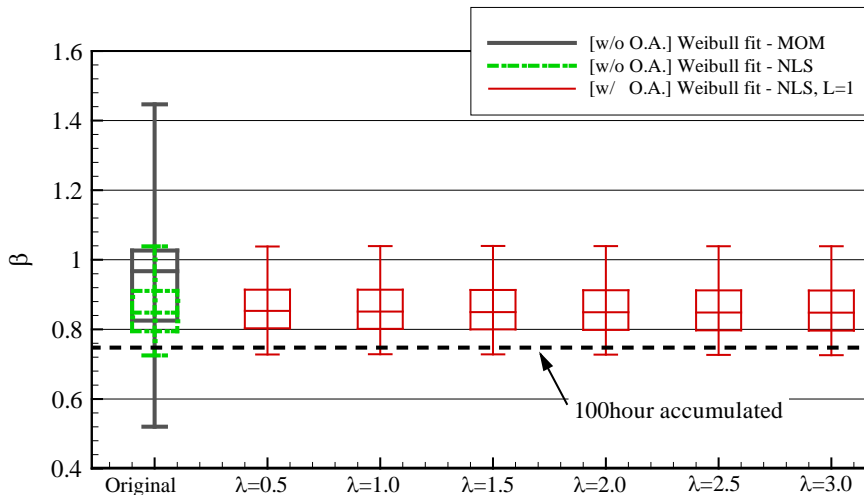


Fig. 4-21 Box-plot showing the distribution of scale parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06

형상모수 또한 이상치 분석을 수행함에 따라 수렴성이 개선되는 것을 Fig. 4-22를 통해 확인할 수 있다. 이상치 분석을 수행하지 않은 원시 데이터에서는 반복실험간의 최대 약 1.6배의 편차를 보였으며 이상치 해석을 수행할 경우 이 차이를 약 1.2배 수준으로 감소시킬 수 있었다. 형상모수는 분포함수의 세 모수 중

장기하중예측에 가장 큰 영향을 끼치는 모수로써 (Lu, 2004) 형상모수의 개선은 이상치해석의 효용성에 있어 큰 의미가 있다.  $\lambda$ 의 변화에 따른 결과의 차이를 살펴보면 상자그림에서 상자의 크기는 유사하지만 상자의 위치가  $\lambda$ 가 커질수록 100시간 수렴값에 더욱 근접한 결과를 주는 것으로 보인다.

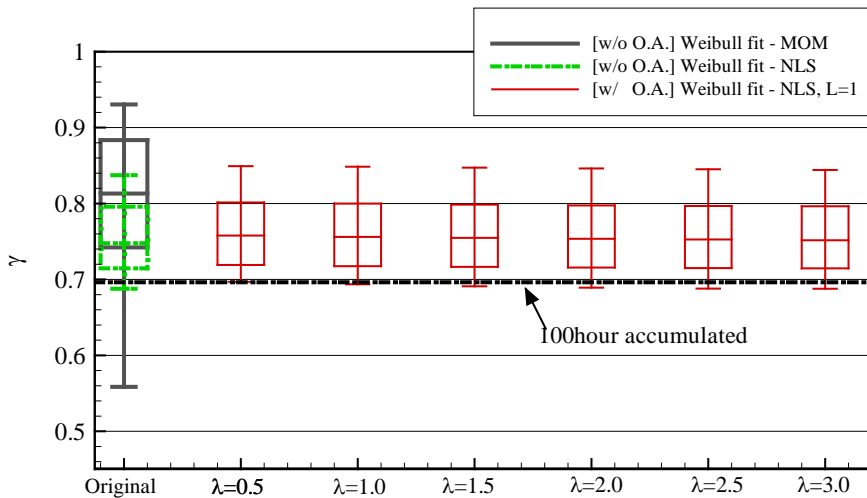
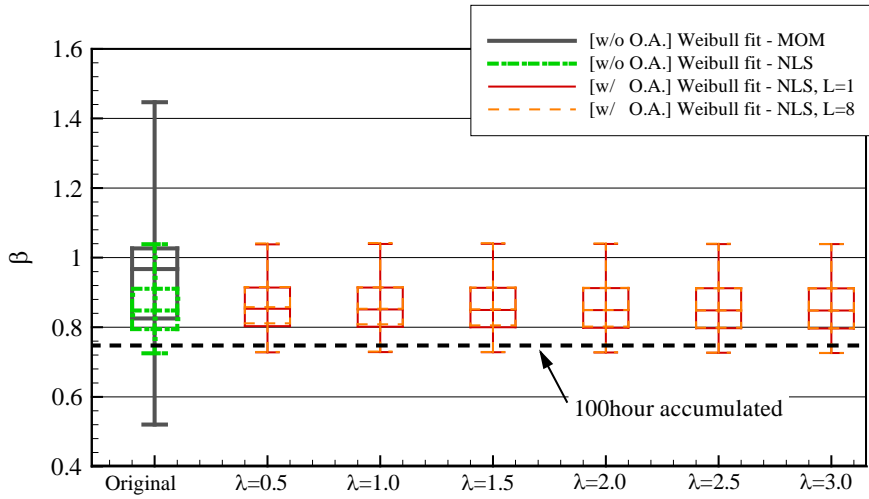
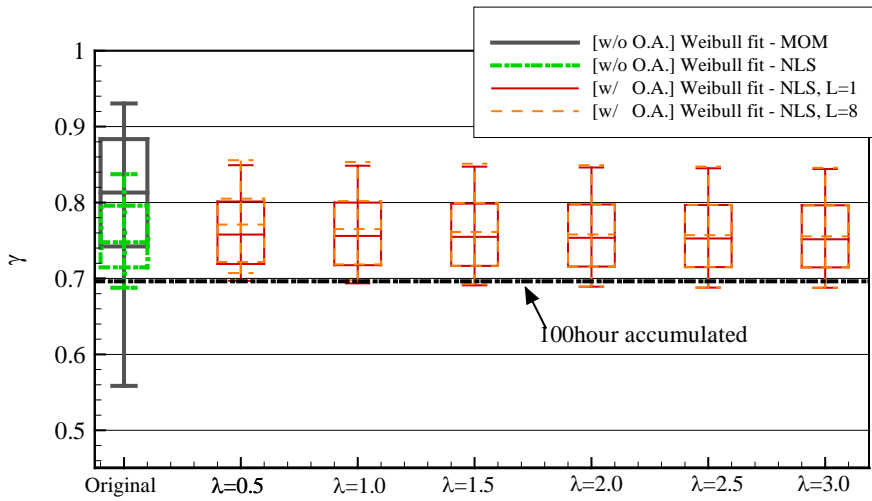


Fig. 4-22 Box-plot showing the distribution of shape parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06

Fig. 4-23에 최대 루프 반복횟수에 따른 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 최대 루프 반복횟수를 1~8회로 조정함에 따라 이상치 분석에서 나타나는 결과의 차이를 분석하였다. 아래의 그래프에서 확인 할 수 있듯이 1회의 이상치 해석을 통해 실험값이 조정되고 나면 추가적인 이상치 탐지, 및 데이터 조정은 결과에 큰 차이를 주지 못하는 것을 알 수 있다.



(a) Scale parameter

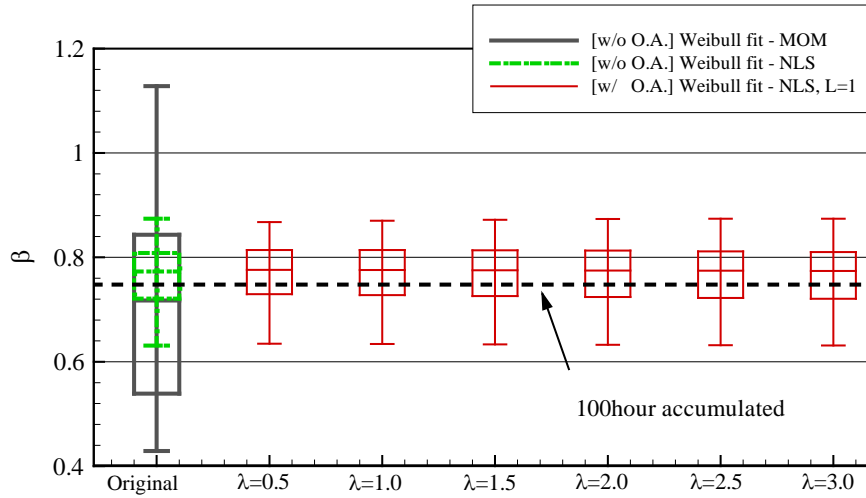


(b) Shape parameter

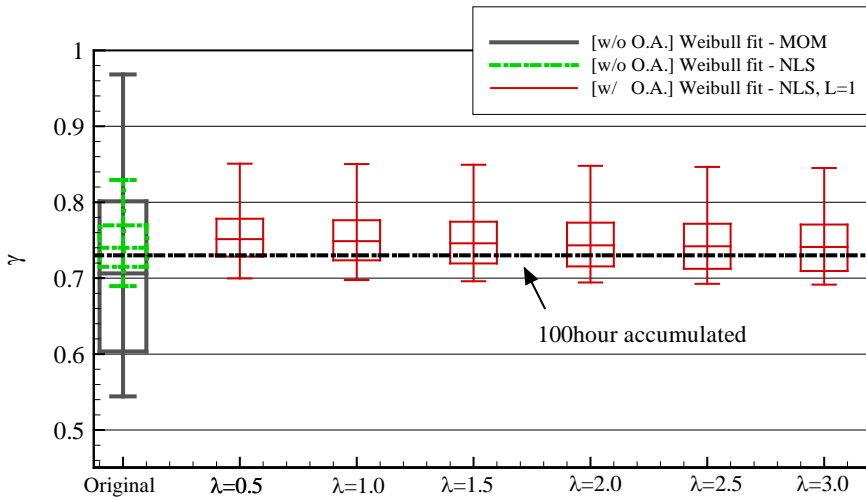
Fig. 4-23 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P06

P06외의 패널 센서에 대한 이상치 분석 효과를 Fig. 4-24~Fig. 4-26에 나타내었다. 앞선 결과와 유사하게 다양한 위치에서의 슬로싱 충격하중 또한 이상치 분석을 수행함에 따라 각 실험간

편차가 줄어들고, 100시간 수렴결과에 보다 가까운 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

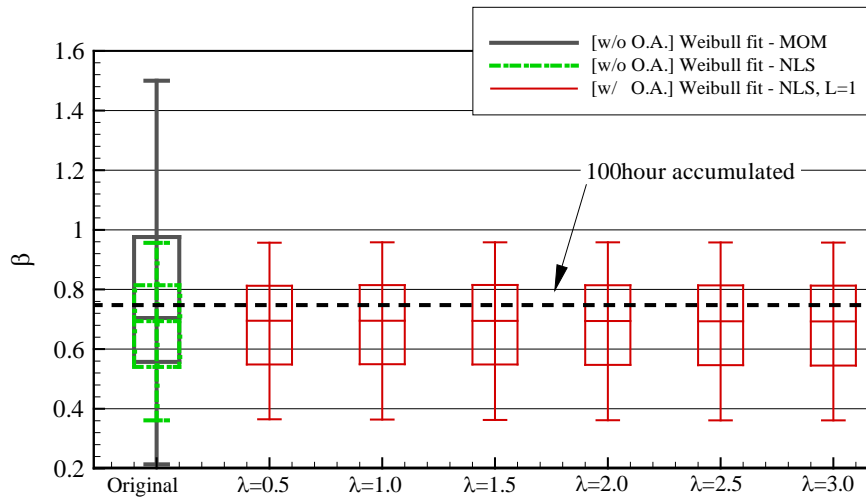


(a) Scale parameter

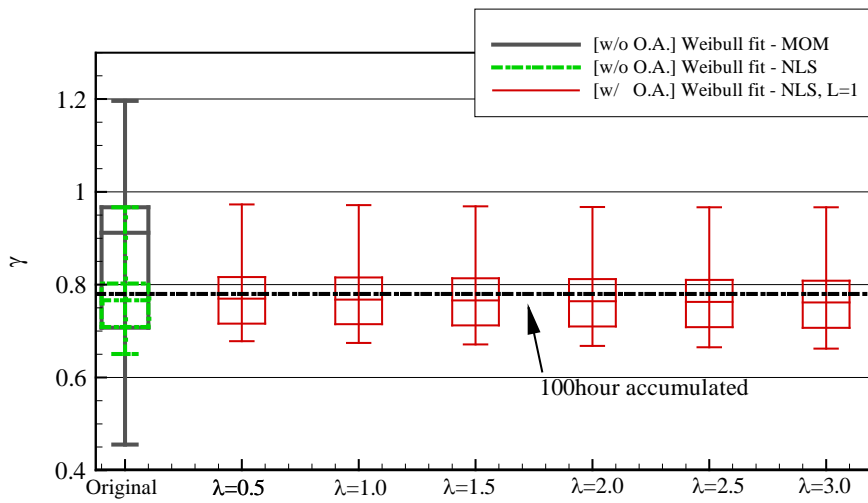


(b) Shape parameter

Fig. 4-24 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P02



(a) Scale parameter



(b) Shape parameter

Fig. 4-25 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P05

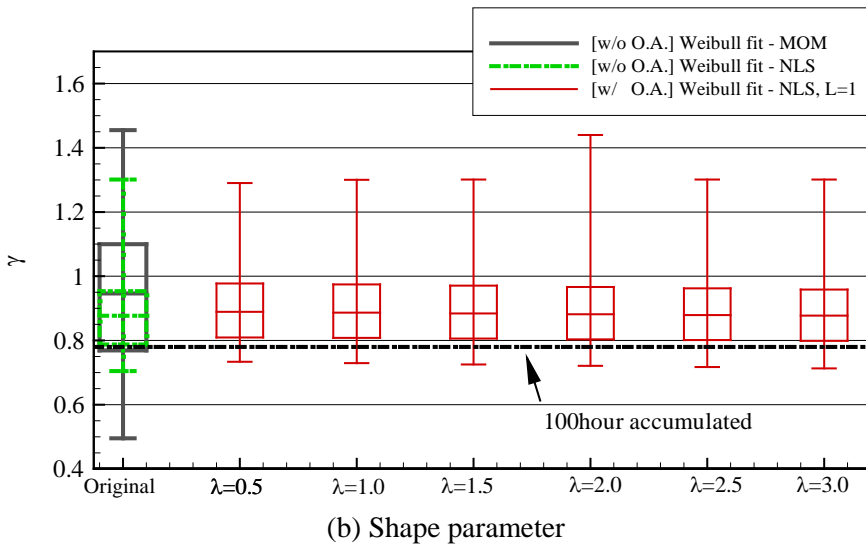
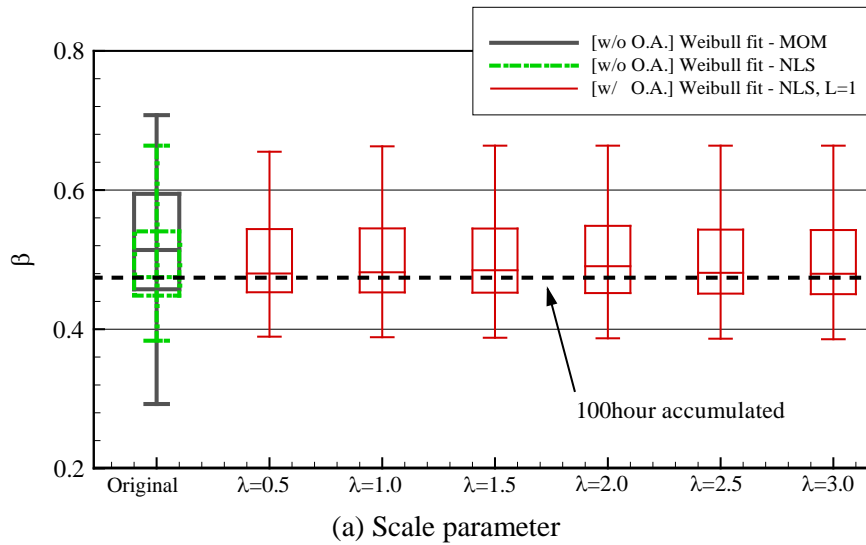


Fig. 4-26 Box-plot showing the distribution of fitting parameters according to application of outlier analysis, filling=0.95H, P08

적재깊이 0.20H의 낮은 적재조건에서 수행된 장시간 모형실험에 대해서도 슬로싱 이상치 분석의 효과를 검토 해

보았다. 낮은 적재조건에서 가장 큰 슬로싱 압력이 나타난 탱크 옆벽면 하단부에 위치한 P18와 P21의 위치모수, 척도모수, 형상모수의 비교 결과를 Fig. 4-27~Fig. 4-29에 나타내었다.

앞선 높은 적재조건 실험결과와 마찬가지로 MOM 방법을 사용한 원시 데이터 결과의 경우 위치모수를 임계압력값보다 높게 추정하는 경우가 거의 대부분이었으며, 실험간의 편차가 상당히 크게 나타났다. 반면 이상치 분석 (비선형 회귀분석)을 수행할 경우 임계 압력값에 상당히 근사한 위치모수를 추정할 수 있으며, 임계압력값보다 큰 위치모수를 갖게되어 낮은 압력값에서 확률밀도함수가 정의되지 않는 모순을 겪는 경우도 없는 것을 알 수 있다.

척도모수와 형상모수의 경우 계측위치에 따라 이상치 분석이 수렴도 개선에 미치는 영향이 차이를 보였다. 가장 큰 슬로싱 하중이 나타나는 P18에서 계측된 데이터의 경우 이상치분석을 적용함에 따라 실험간 편차가 줄어들고 100시간 실험결과에 수렴하는 결과를 보이는 반면, P21의 데이터에서는 최대 최소간 편차는 개선되는 경향을 뚜렷히 보이나 사분위수 범위의 길이와 100시간 데이터와의 차이 등을 종합 적으로 판단 시 그 효과를 판단하기가 힘든 경향을 보였다. NLS(W)를 이용한 Weibull 분포함수 근사시 사용한 잔차의 가중치 부여 수준이 영향을 끼친 것으로 보이며, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

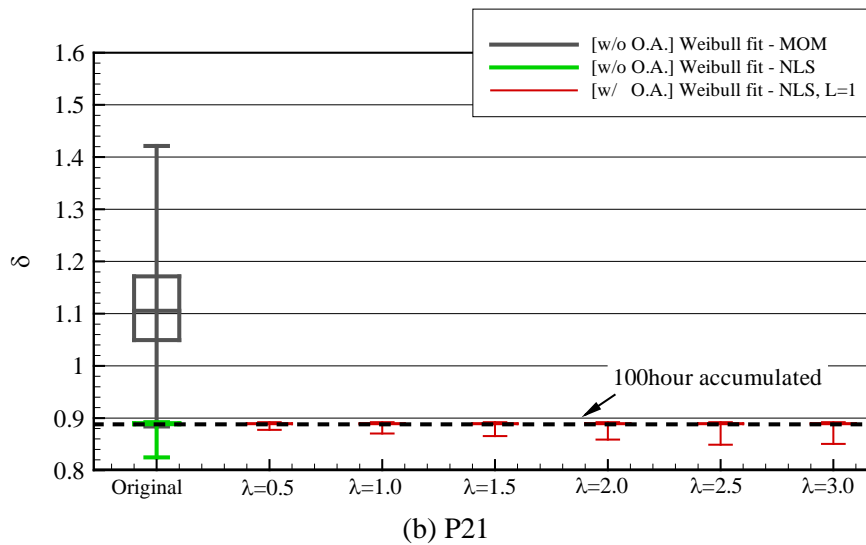
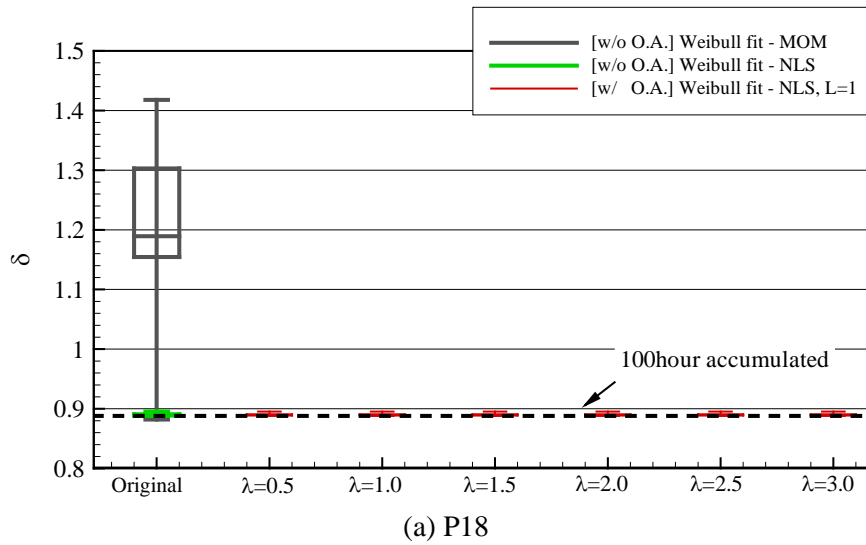
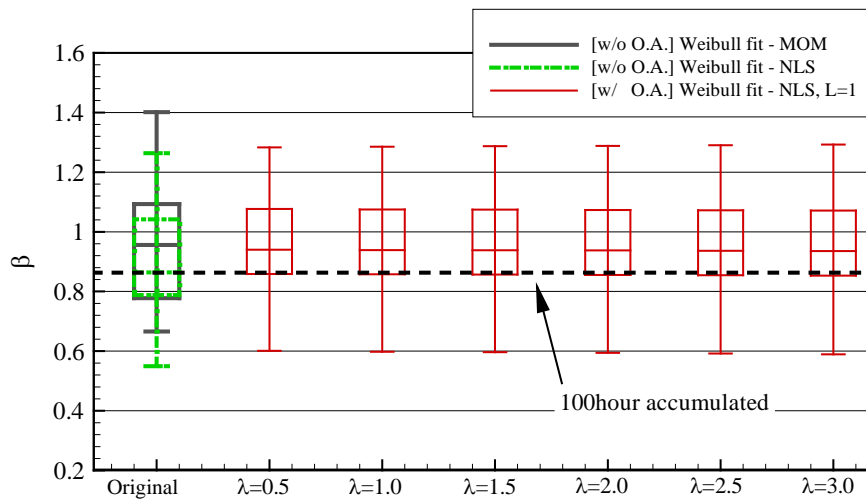
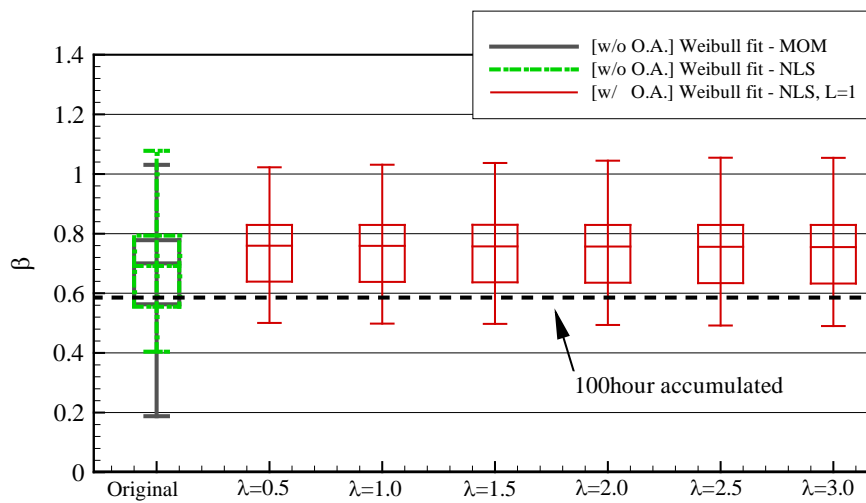


Fig. 4-27 Box-plot showing the distribution of location parameters according to application of outlier analysis, filling=0.20H





(a) P18



(b) P21

Fig. 4-28 Box-plot showing the distribution of scale parameters according to application of outlier analysis, filling=0.20H

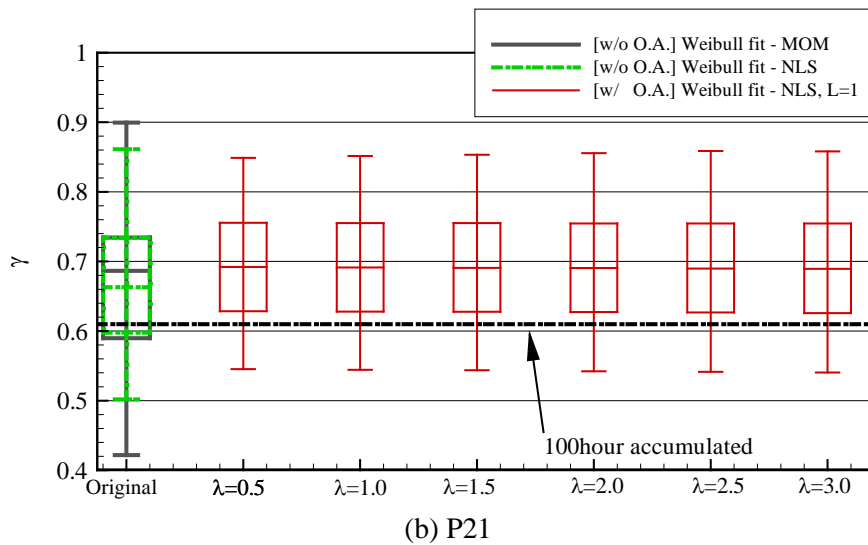
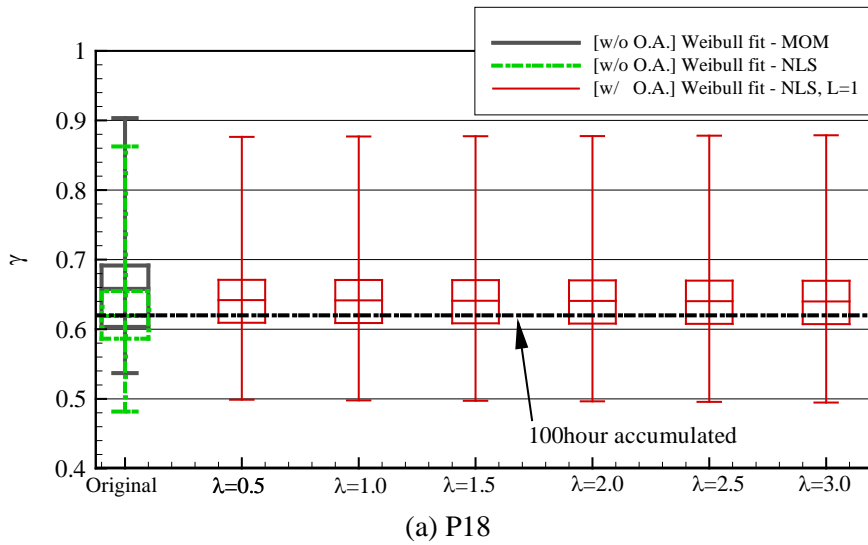


Fig. 4-29 Box-plot showing the distribution of shape parameters according to application of outlier analysis, filling=0.20H

## 4.4 슬로싱 하중 장기 예측 및 분석

### 4.4.1 슬로싱 충격압력 신호의 특성

우선 모형실험에서 나타난 슬로싱 충격압력신호의 특성을 살펴보았다. 0.15H에서 나타나는 대표적인 슬로싱 충격압력신호를 Fig. 4-30~Fig. 4-31에 나타내었다. 그래프에 나타난 실험 조건은  $T_z=6.0\text{sec}$ ,  $H_s=5.0\text{m}$  조건이며 낮은 적재 조건 실험 중 가장 큰 슬로싱 충격이 나타난 조건이다. 주로 탱크 측면의 하단부 모서리에 위치한 P18에서 큰 크기의 슬로싱 충격이 계측되었다.

슬로싱 압력신호는 크게 두 가지 형상으로 구분되었다. 첫 번째는 충격 순간에 압력센서와 유체 사이에 공기가 포집되어 충격과 함께 포집된 공기가 압축, 팽창을 반복함으로 인해 1차 충격이후 진동하는 형태의 압력신호이고(Fig. 4-30(a)), 두 번째는 탱크 벽면에서 접수면이 빠르게 상승하며 유체에 의한 직접적인 충격을 가하게 되어 1차 충격 이후 압력 값이 진동 없이 빠르게 감소하는 형태이다 (Fig. 4-30(b)).

낮은 적재조건의 주된 슬로싱 충격위치는 적재깊이 부근의 탱크 측면이지만, 1차적으로 탱크측면에 충격을 발생시킨 후 유체가 벽면을 타고 상승하여 탱크 상부챔퍼에 충격을 가하기도 하였다. 이때 발생하는 슬로싱 충격의 경우 상대적으로 크기가 작으며, 탱크 측면에서 발생하는 측면과는 달리 유체와 벽면 사이에 공기가 갇히는 경우가 드물어 대부분의 압력신호가 Fig.

4-31에 나타난 것과 같이 유체에 의한 직접충격으로 인해 발생하는 짧은 상승시간 및 2차 진동 없이 빠르게 압력값이 감소하는 형상을 보였다.

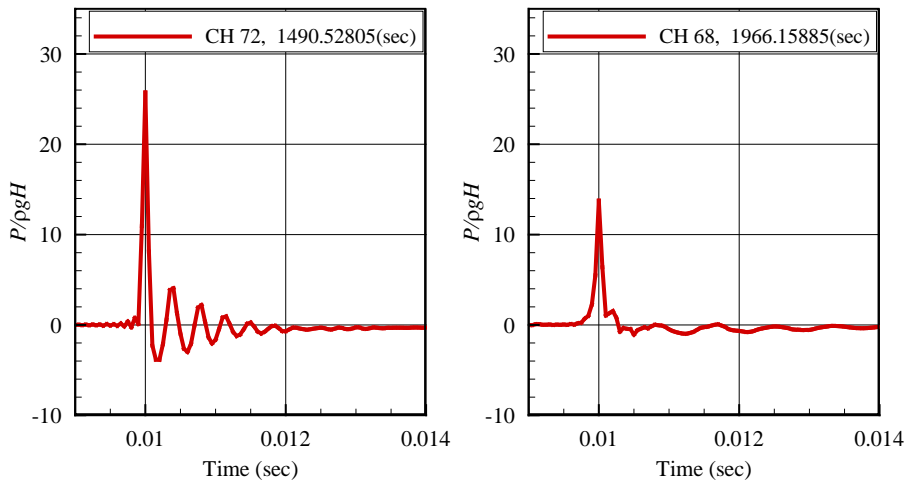


Fig. 4-30 Representative impact signals from model test, filling=0.15H, Tz=6.0s, Hs=5.0m, P18, side wall

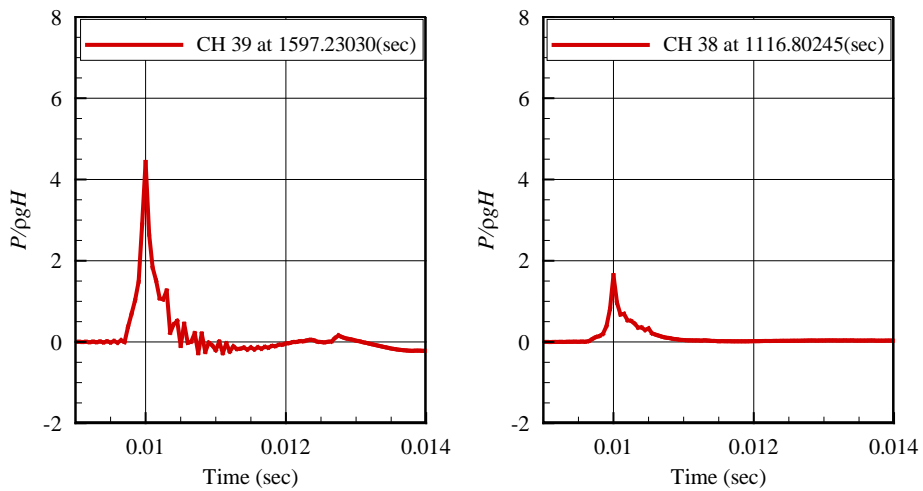


Fig. 4-31 Representative impact signals from model test, filling=0.15H, Tz=6.0s, Hs=5.0m, P13, upper chamfer

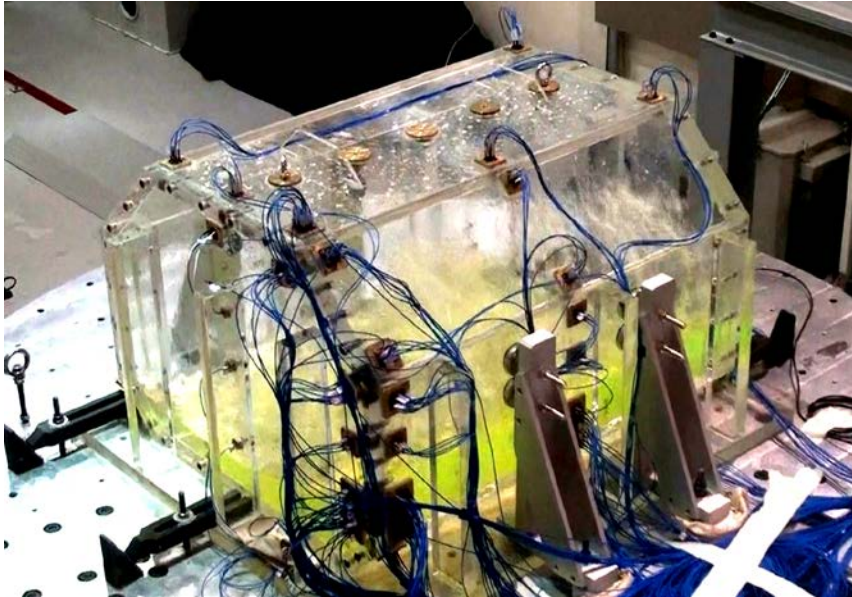


Fig. 4-32 Snapshot of sloshing test, filling=0.15H,  $T_z=6.0s$ ,  $H_s=5.0m$

Fig. 4-33에 적재깊이 0.95H조건 실험에서 나타난 슬로싱 압력신호의 예를 나타내었다. 주요 충격위치는 탱크 상부 뚜껑과 상단 챔퍼 부근이며 대다수의 충격이 충격 시 기체가 갇혀 진동하는 형태를 보였다. 이때 압력신호의 진동 주파수는 유체와 탱크 사이에 갇힌 기체의 크기에 따라 달라지며 많은 기체가 갇힐수록 긴 주기의 진동을 보인다 (Faltinsen & Timokha, 2009; Kim et al., 2017). 불규칙 탱크운동에 의해 발생한 진동하는 형태의 충격압력신호가 각기 다른 주파수의 진동주기를 갖는 것을 아래의 그래프를 통해서도 잘 확인할 수 있다.

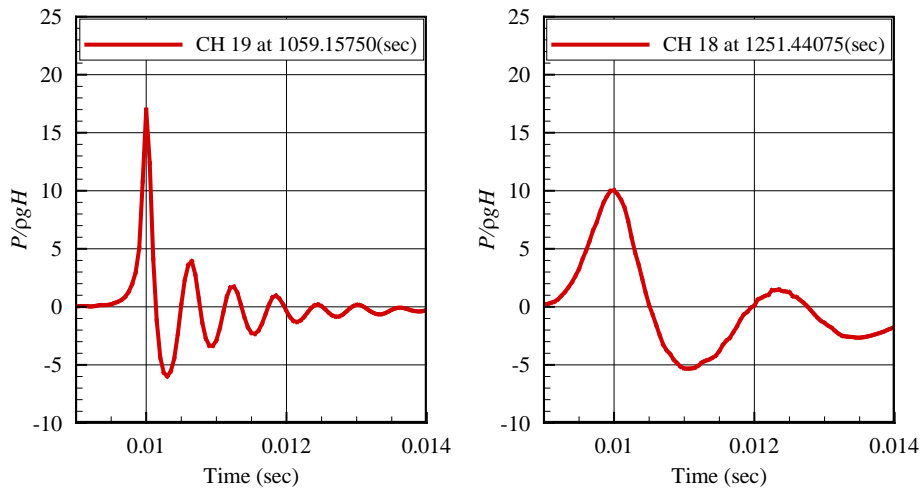


Fig. 4-33 Representative impact signals from model test, filling=0.95H, Tz=7.5s, Hs=11.1m

#### 4.4.2 장기 슬로싱 하중 예측

높은 적재조건에서 수행된 14가지 환경조건에 대한 모형 실험결과이며, 실험에서 나타난 슬로싱의 정도를 가늠하기 위해 채현기간 3시간에 해당하는 슬로싱 최대 충격압을 막대그래프로 나타내었다(Fig. 4-34(a)~(c)). 각 환경조건은 실선기준 5시간 실험을 2회 반복하여 총 10시간의 모형실험을 수행하였으며, 아래의 그래프는 2회 반복실험 데이터를 취합한 결과를 나타낸다. 각각의 환경조건에서의 슬로싱 충격하중을 탱크 상부 모서리에 위치한 P06, P08, P12의 세 가지 주요 위치에서 비교하였다.

전반적인 경향을 살펴보면 해상상태의 Tz가 탱크의 길이방향 공진주기에 가까워 질 수록, 또한 동일한 Tz 조건의 경우

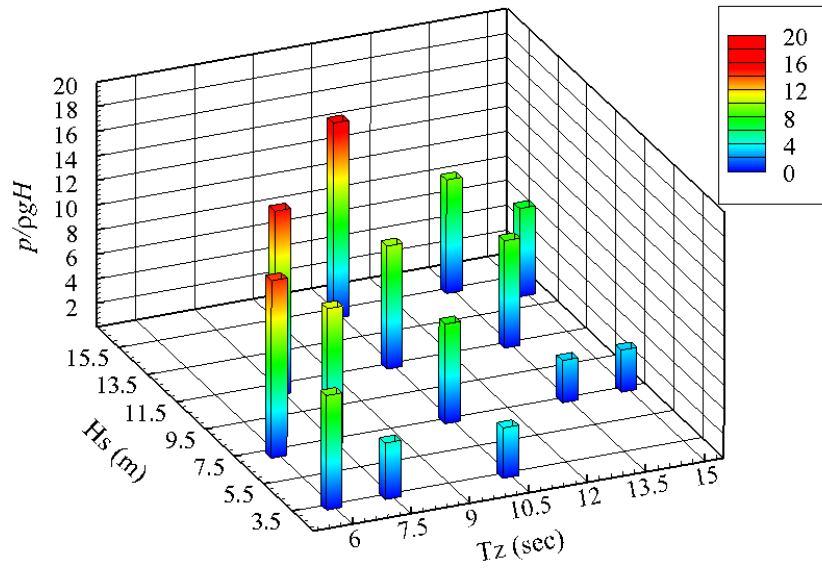
유의파고가 클수록 더 큰 슬로싱 하중이 나타나는 것을 아래의 그래프를 통해 확인할 수 있다. 적재조건에 따른 탱크의 길이 방향 및 폭 방향 이론적 공진주기는 Fig. 4-35에 정리하였다. 꼭지점을 공유하는 세 패널에서 나타나는 슬로싱 하중의 크기가 큰 편차를 보이며 P06과 P12의 경우 전반적으로 유사한 수준의 충격압력이 나타나지만 각 환경조건에 따라 크기의 상대적 경중은 다른 양상을 보였다.

예외적으로 동일한 Tz 조건에서 유의파고가 상대적으로 작은 환경 조건이 더 큰 슬로싱 충격압력을 보인 경우가 있었다. 해당 조건에서의 슬로싱 하중의 확률분포를 비교하여 Fig. 4-36에 정리하였다. P06의 경우 유의파고, 즉 탱크의 가진이 커짐에 따라 이로 인해 유발되는 슬로싱 충격의 발현빈도와 압력 크기가 함께 증가하였다. 반면 P12의 경우 탱크의 가진이 커짐에 따라 슬로싱 충격의 발현빈도는 증가하였으나 압력의 크기는 다소 감소하였다. 이와 같은 경향은 이상치에 의해 분포함수의 근사가 왜곡된 것은 아님을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이처럼 운동 진폭이 증가하였음에도 슬로싱 압력 값이 감소하는 현상에 대한 주된 원인은 해당조건의 압력 시계열 생성시 사용된 위상각의 조합의 랜덤성으로 파악되나 명확한 분석을 위해서는 추가적인 실험적 연구가 필요할 것으로 보인다.

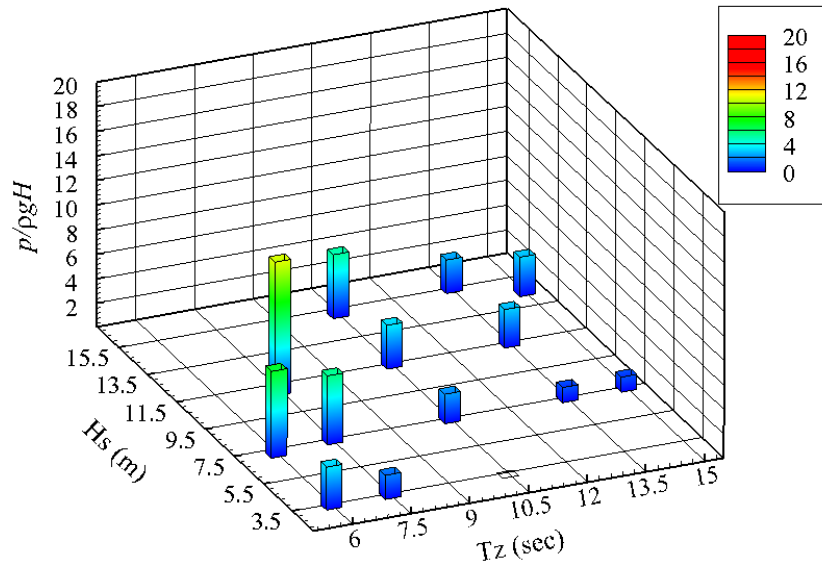
장기 하중 예측을 위해서는 각 해상조건의 발현빈도 또한 중요한 역할을 한다. 이에 각 환경조건의 발현빈도를 Fig.

4-34(d)에 나타내었다. 발현빈도를 나타낸 그래프와 슬로싱 하중을 나타낸 그래프를 함께 살펴보면 전반적으로 큰 슬로싱 하중을 보이는 환경조건은 상대적으로 상당히 낮은 수준의 발현빈도를 보이는 것을 알 수 있다. 결국 장기적 관점에서 화물창에 나타나는 슬로싱 하중의 확률분포를 살펴보기 위해서는 발현빈도를 고려한 하중 분포 곡선을 기준으로 기여도를 살펴보아야 함을 예상할 수 있다.

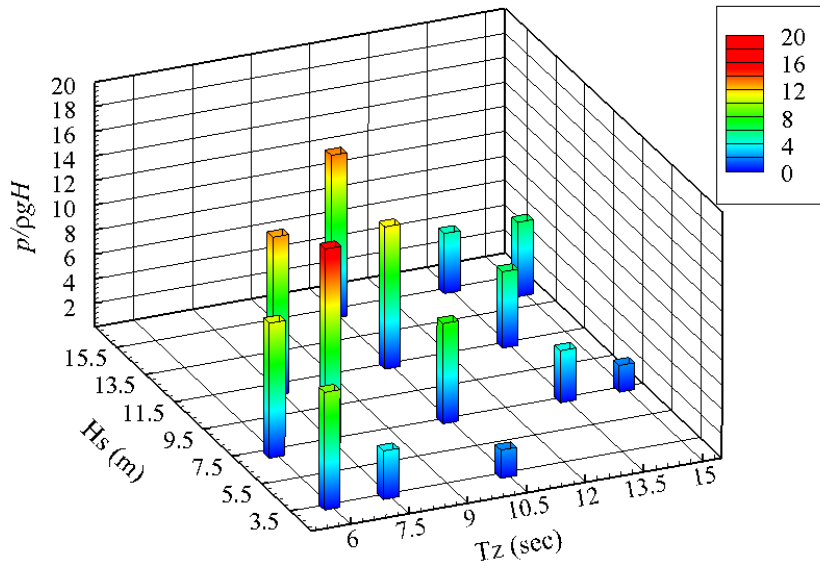




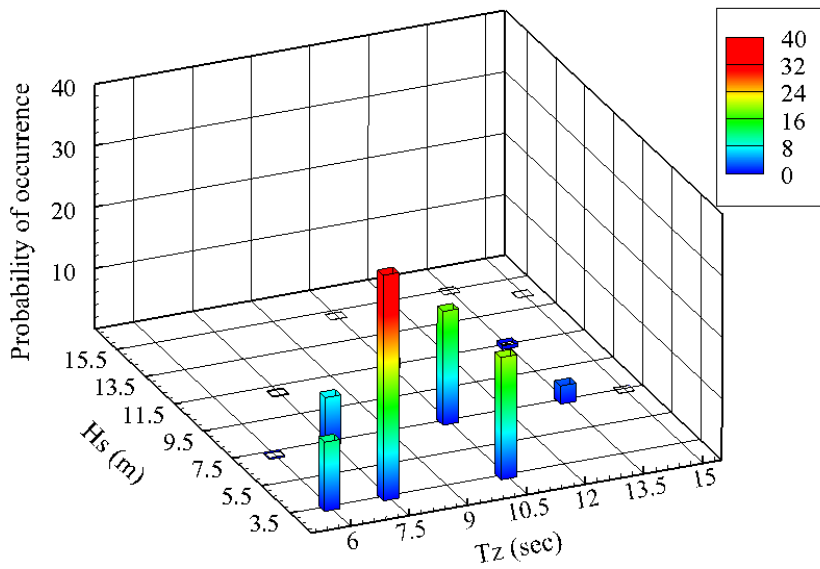
(a) P06



(b) P08



(c) P12



(d) Probability of occurrence

Fig. 4-34 Bar chart of probable extreme pressures with 3hour return period of various wave conditions, filling=0.95H, heading=150deg

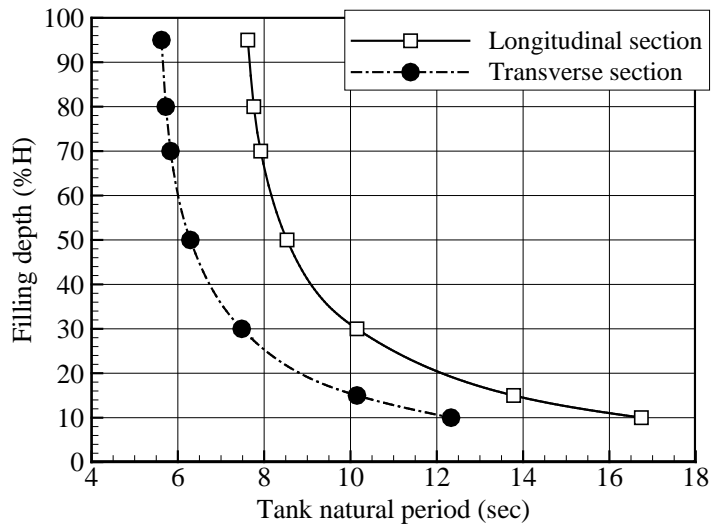
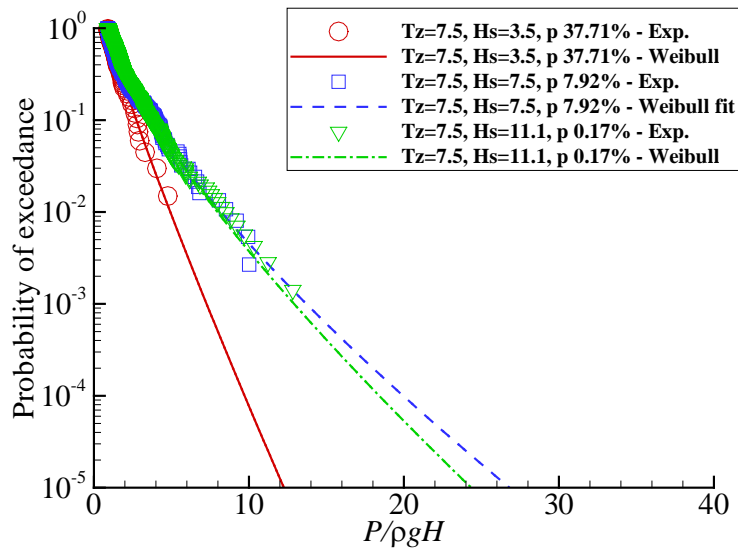


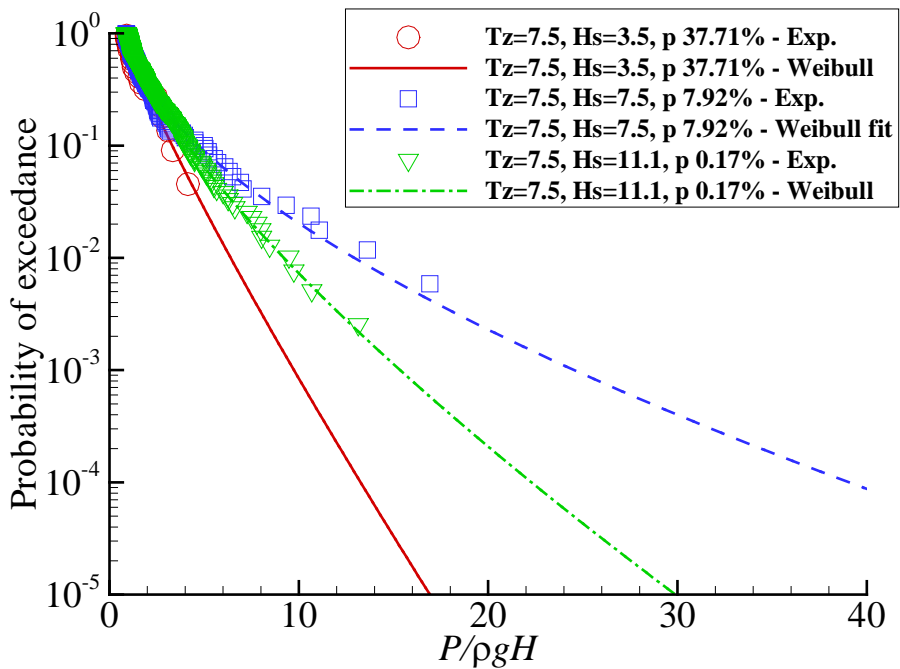
Fig. 4-35 Natural period of model tank, real scale

Table 4-10 Comparison of number of sloshing peaks with various significant wave height condition, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5sec

	P06	P08	P12
Tz=7.5sec, Hs=3.5m	66	11	21
Tz=7.5sec, Hs=7.5m	372	109	169
Tz=7.5sec, Hs=11.1m	706	249	390



(a) P06, tank roof



(b) P12, upper chamfer

Fig. 4-36 Comparison of probability of sloshing pressure with various significant wave height condition, filling=0.95H, heading=150deg,

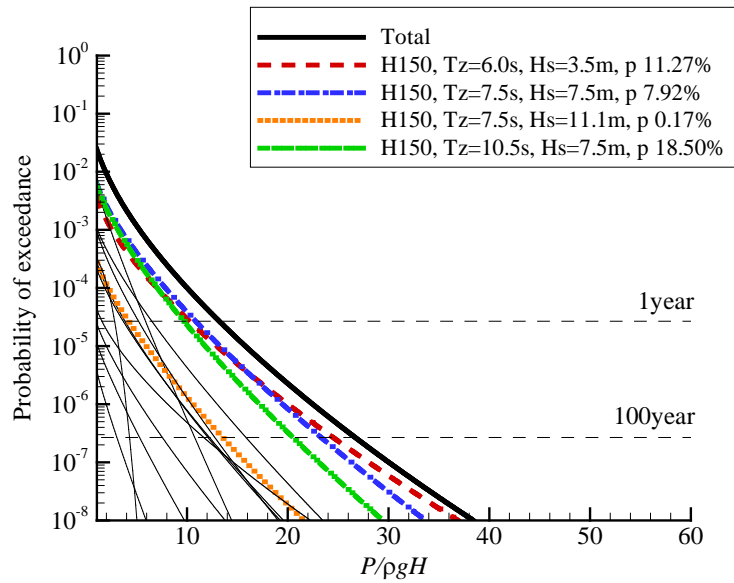
$T_z=7.5$ sec

앞선 해석 결과를 바탕으로 적재조건  $0.95H$ 의 선수각  $150^\circ$  조건에 대하여 슬로싱 하중의 장기 확률분포를 도출하여 보았다 (Fig. 4-37). 도출된 장기확률분포를 굵은 실선 (“Total”로 표기)으로 나타내었으며, 장기 확률분포에 큰 영향을 미치거나 추가 설명이 필요한 조건에 대해서 각기 다른 형태의 굵은 선으로 나타내었다. 전반적으로 14개의 해상상태 중 장기 슬로싱 하중의 확률분포에 큰 영향을 미치는 2~3가지 해상조건이 명확하게 나타나며, 큰 기여도를 보이는 해상조건은 압력 계측 위치에 따라 다소 차이를 보였다.

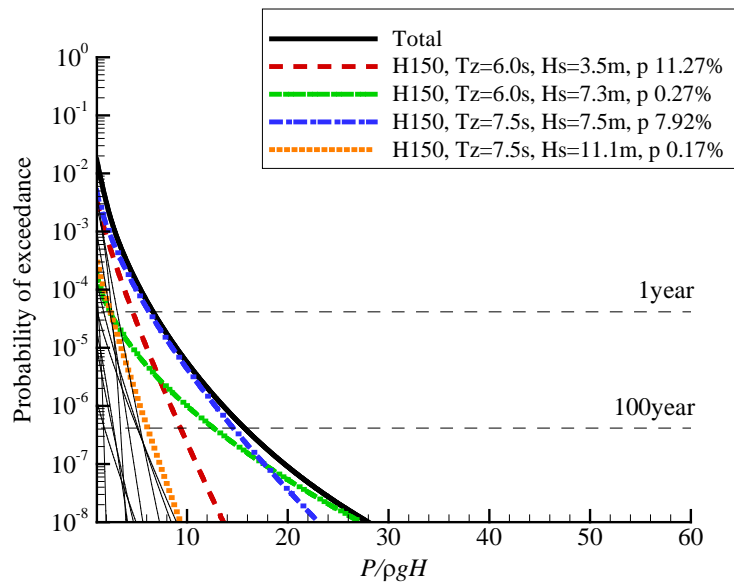
모형 실험에서 가장 큰 슬로싱 하중을 보였던 (P06기준),  $T_z=7.5s$ ,  $H_s=11.1m$ , 조건의 경우 낮은 발현 빈도로 인하여 장기적 확률분포에 큰 영향을 끼치지 못하며, 실험을 통해 나타난 압력 값은 다소 작으나 상대적으로 큰 발현빈도를 보이는 조건들이 장기 확률분포 결과에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 결과적으로 해석결과의 신뢰성을 높이기 위한 추가실험 조건은 각 해상상태 별 장기 확률분포에 대한 기여도를 분석을 바탕으로 선정하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

유사한 이유로 모형실험결과로부터 나타난 슬로싱 하중의 단순 비교 시 큰 압력값이 가장 많이 나타난 위치는 P06이지만 장기적 관점에서의 확률분포를 살펴보면 오히려 P12이 더 큰 슬로싱 하중을 예측하는 것 또한 주목할 만한 점이라 할 수 있다. 장기 예측에서 각 환경조건의 발현 빈도는 모형실험만큼이나

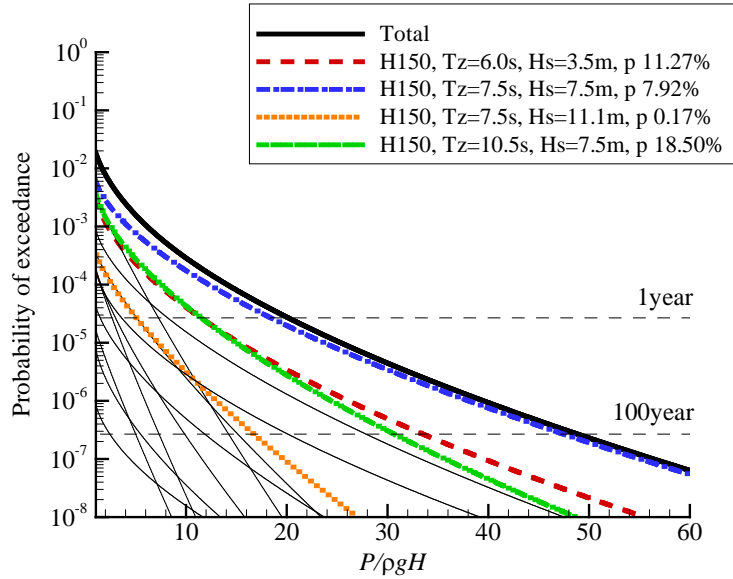
중요하다고 할 수 있다.



(a) P06



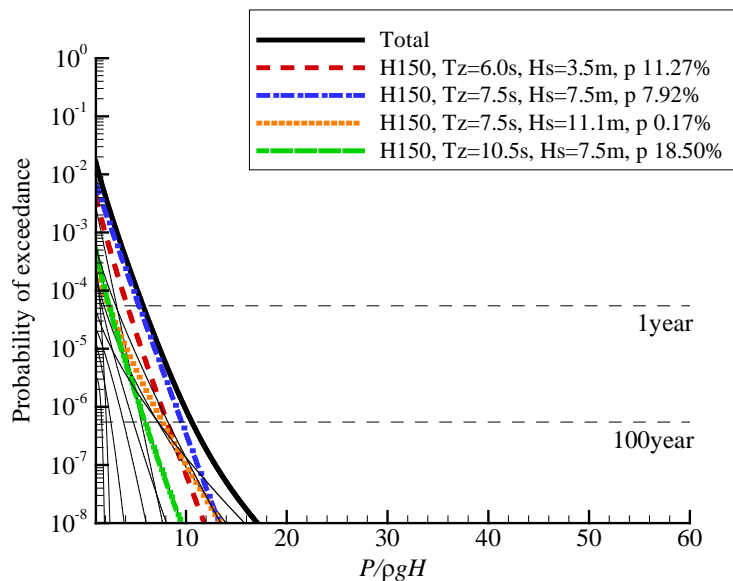
(b) P08



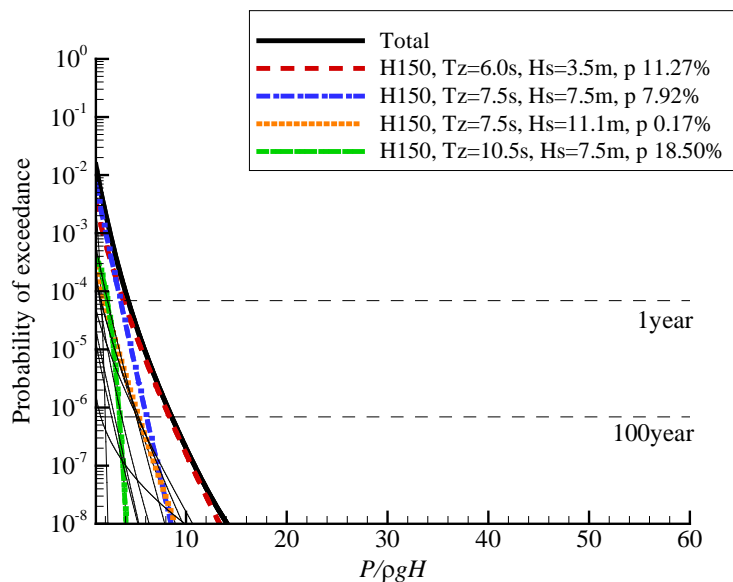
(c) P12

Fig. 4-37 Long-term probability distribution of sloshing load, filling=0.95H, heading=150deg, data accumulated from 1x1 single sensor

동일한 센서에 위치한 인접한 센서들을 이용하여 NxN 평균화한 압력신호를 바탕으로 해석을 수행하여 하중 작용 면적에 따른 슬로싱 장기하중의 확률분포를 살펴보았다 (Fig. 4-38). P06에 위치한 3x3격자의 9개 센서를 바탕으로 2x2 평균화, 3x3 평균화하여 새로운 신호를 생성한 후 앞선 개별 센서 결과와 동일한 통계해석을 수행하였다. 평균화를 수행함에 따라 시간당 슬로싱 충격발현횟수와 동일 재현기간에 나타날 것으로 예상되는 최대 슬로싱 하중 값이 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) 2x2 averaged



(b) 3x3 averaged

Fig. 4-38 Long-term probability distribution of sloshing load, filling=0.95H, heading=150deg, NxN averaged from P06

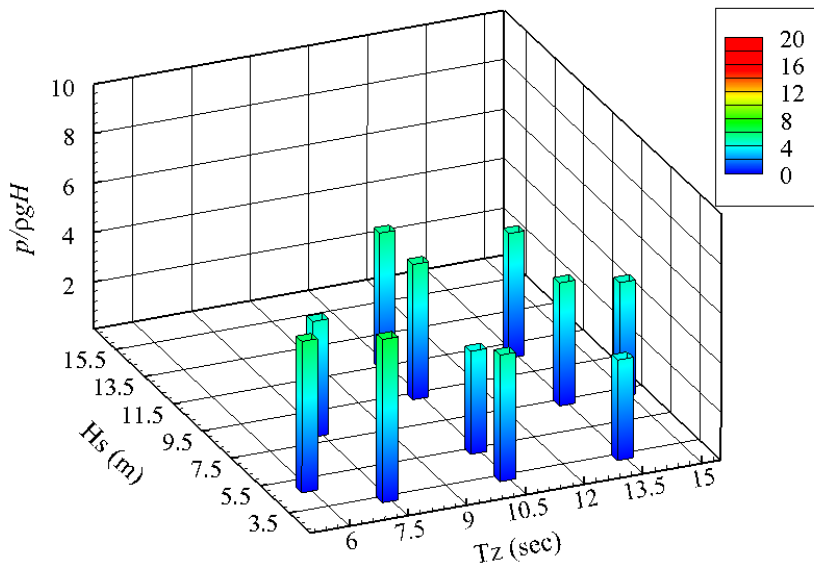


Fig. 4-39는 낮은 적재조건에서 수행된 11가지 환경조건에 대한 모형 실험결과의 일부이다. 각각의 환경조건에서의 3시간 최대 슬로싱 충격하중을 탱크 측면 하단부 모서리에 위치한 P11, P18, P22의 세 가지 주요 위치에서 비교하였다.

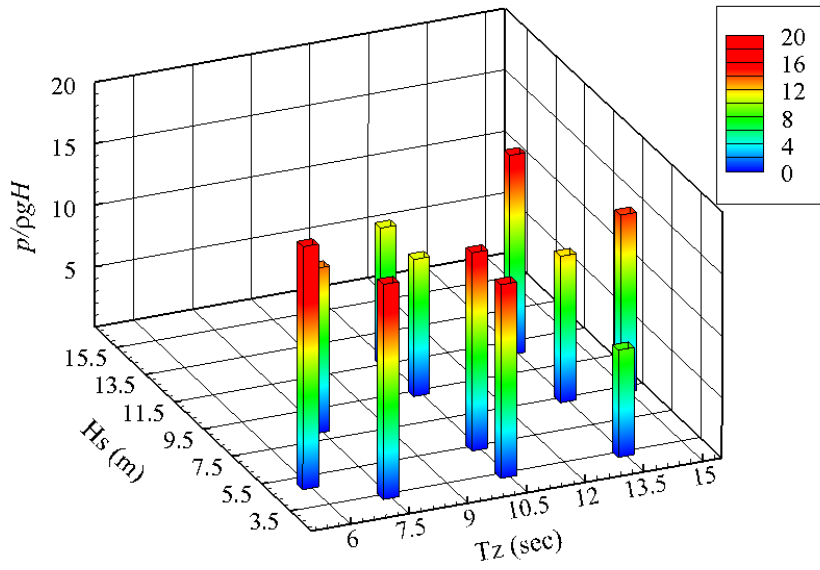
전반적으로 큰 하중이 나타나는 위치는 P18이며, 이는 앞서 정의한 적재깊이 별 슬로싱 핫스팟과 일치하는 경향이다. 가장 큰 슬로싱 하중이 나타난 해상조건은  $T_z=6\text{sec}$  조건으로 해당 적재깊이의 폭 방향 이론적 공진주기인 10sec에 비하여 짧은 주기의 탱크 운동이 지배적인 조건이다. 이 같은 결과는 슬로싱의 점프현상으로 설명이 가능하다. 점프현상이란 적재깊이와 탱크 높이의 비 ( $h/H$ )가 0.3368보다 이 경우 이론적 공진주기보다 짧은 주기의 가진 조건에서 공진이 발생하며, 공진주기 부근에서 불안정한 해를 가지는 것을 말한다 (Faltinsen and Timokha, 2009). 본 연구에 사용된 3차원 모형탱크와 동일한 형상의 폭 방향 2차원 모형탱크에 대하여 규칙운동 실험을 수행한 바가 있으며 (Kim et al., 2013), 해당 모형실험에서도 낮은 적재조건인 경우 이론상 공진 주파수 ( $\omega_0$ )보다 빠른 가진 주파수 ( $\omega$ )에서 큰 슬로싱 하중이 나타나며 불규칙성이 증가하는 것을 확인하였다 (Fig. 4-40).

앞선 높은 적재조건 실험에서 유의파고가 높아짐에 따라 유발되는 슬로싱 하중의 크기가 점차적으로 증가했던 반면, 낮은 적재조건 실험의 경우 유의파고에 따른 슬로싱 하중 크기변화의 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 낮은 적재조건 실험의 경우 탱크

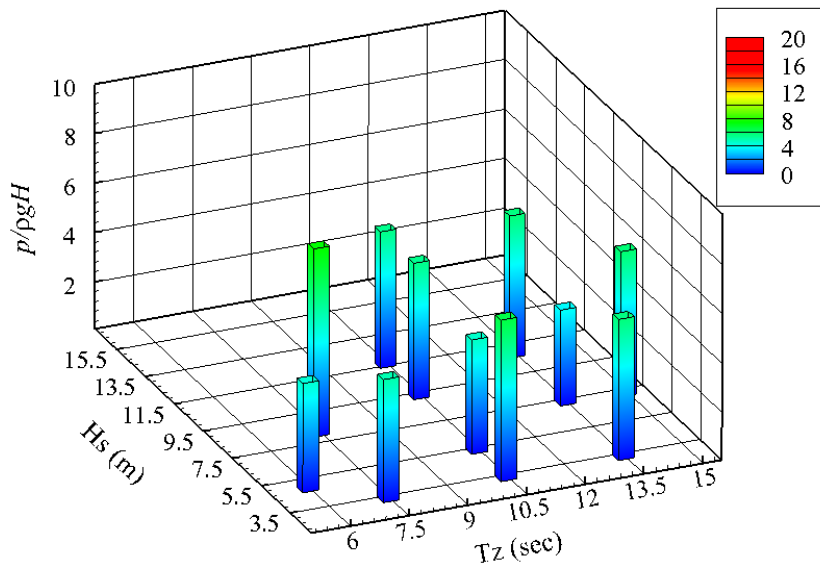
내부에서 파가 벽면에 도달하기 이전에 쇄파 현상이 일어나는 것을 관찰 할 수 있었으며 (Fig. 4-41), 이러한 쇄파 현상은 횡동요 운동이 심해질수록 더욱 빈번하게 나타났다. 유의파고가 큰 환경조건일수록 탱크가 유체에 전달하는 에너지가 증가하는 반면 쇄파현상 또한 크게 발생하여 유체가 압력센서가 위치한 벽면에 도달하기 이전에 에너지의 상당부분을 소실하게 되어 유의파고에 따른 슬로싱 하중 크기의 뚜렷한 경향을 보기 어려워진 것으로 파악된다.



(a) P11

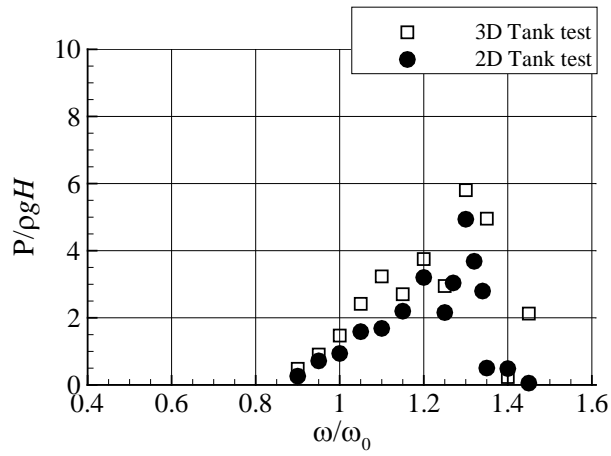


(b) P18

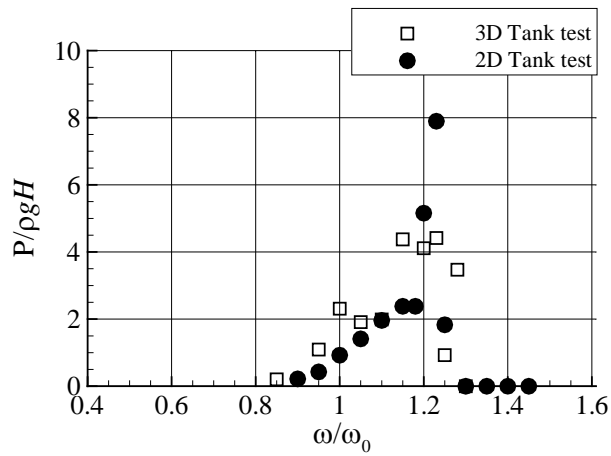


(c) P22

Fig. 4-39 Bar chart of probable extreme pressures with 3hour return period of various wave conditions, filling=0.15H, heading=90deg

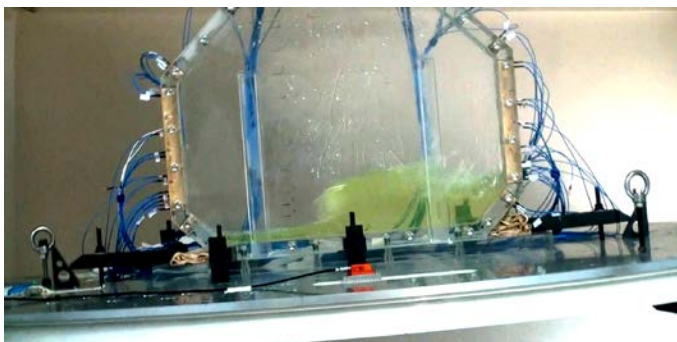


(a) Sinusoidal sway motion with amplitude=0.5B



(b) Sinusoidal roll motion with amplitude=3deg

Fig. 4-40 2D and 3D harmonic motion test, filling=0.15H, P18



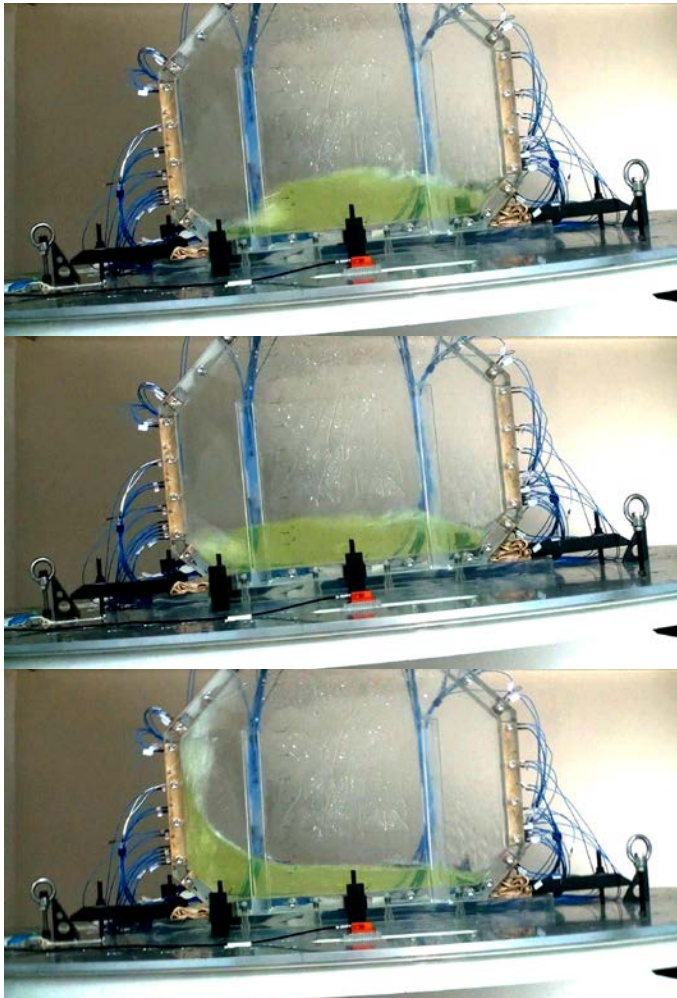
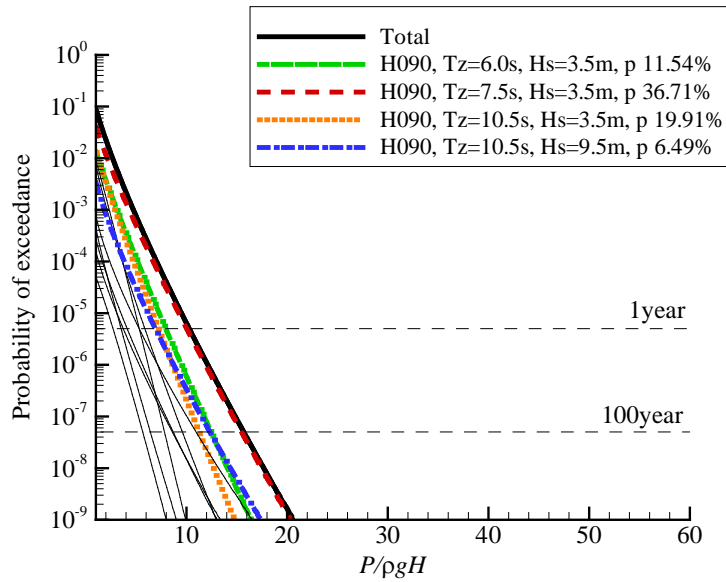


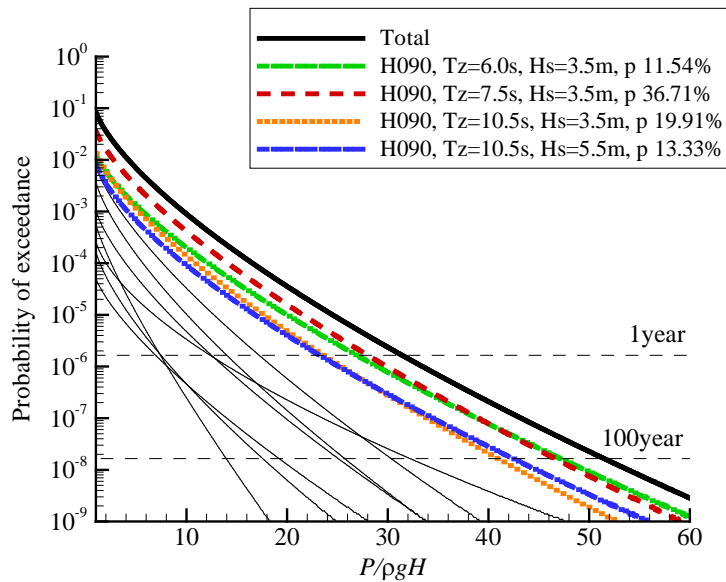
Fig. 4-41 Wave breaking before sloshing impact on the tank side wall,  
0.15H, harmonic roll motion

앞선 해석 결과를 바탕으로 적재조건 0.15H의 선수각 90도 조건에 대하여 슬로싱 하중의 장기 확률분포를 도출하여 보았다 (Fig. 4-42). 높은 적재조건인 결과와는 달리 큰 슬로싱이 나타난 조건이 발현빈도 또한 비교적 높아 장기 확률분포에 큰 기여를 하고 있음을 알 수 있다. 탱크 선수 격벽과 측면 벽, 하부 챔퍼가

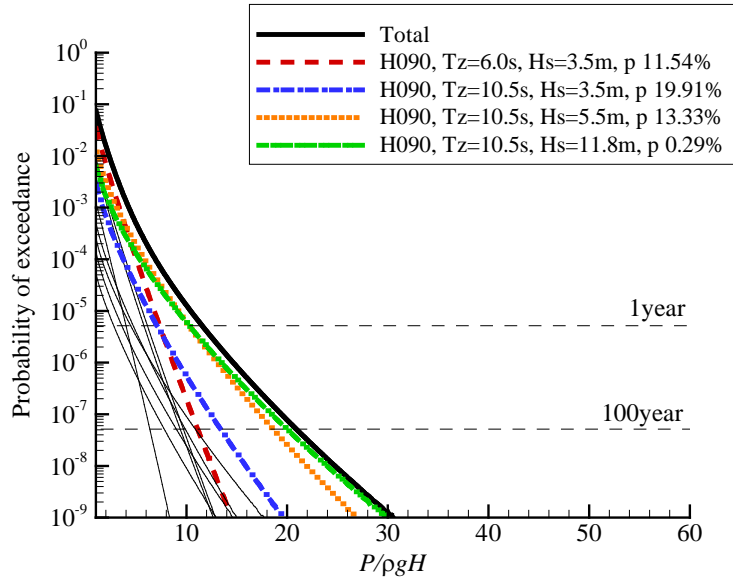
만나는 모서리를 공유하는 세 센서패널에서 장기하중분포에 큰 기여를 하는 환경조건이 다소 차이를 보였다.



(a) P11



(b) P18



(c) P22

Fig. 4-42 Long-term probability distribution of sloshing load, filling=0.15H, heading=90deg

## 4.5 기존 절차와의 비교

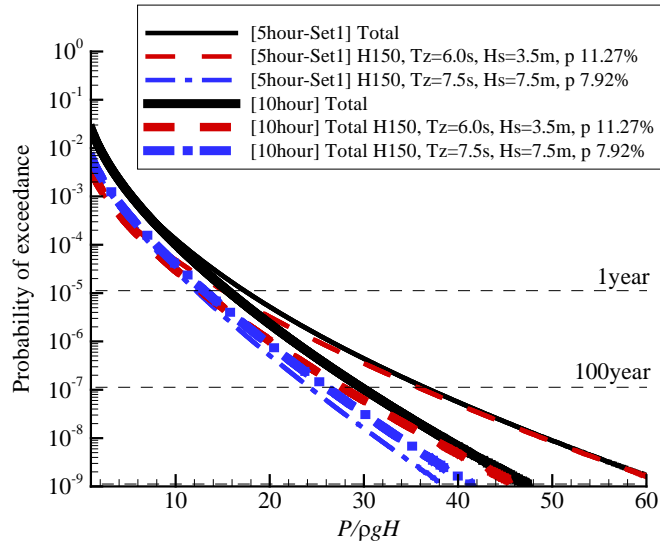
### 4.5.1 실험 기준 시간에 따른 장기 슬로싱 하중 비교

본 연구에서는 138k LNG 운반선 모형실험에서 각 조건 별로 실선기준 5시간 실험을 2회 수행하였고, 이를 취합한 10시간 데이터를 바탕으로 장기 하중 해석을 수행한 결과를 바탕으로 하중특성을 살펴보았다 (4.4장). 본 장에서는 모형실험시간이 장기 슬로싱 하중 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 앞선 실험데이터를 두 가지 조합의 5시간 실험 데이터군으로 나누어

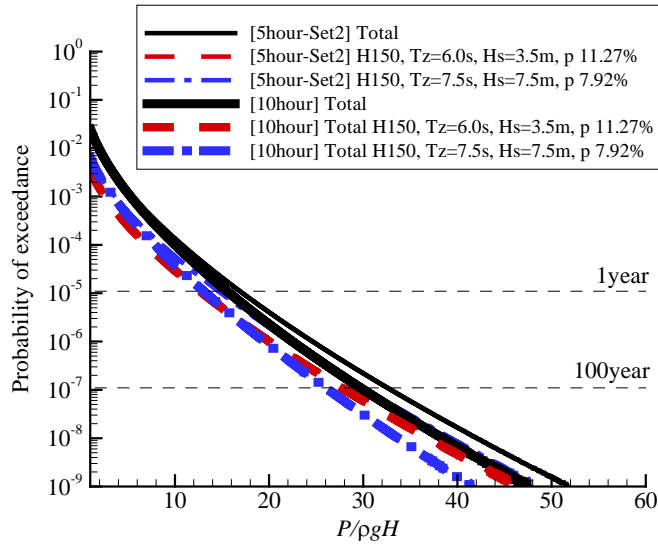
각각의 데이터 조합에 대한 장기 예측을 수행한 후, 그 결과를 10시간 실험을 바탕으로 도출한 장기 예측 결과와 비교하였다.

적재조건 0.95H에서 탱크 상부뚜껑에 위치한 P06 지역에서 나타나는 슬로싱 하중의 장기 예측 결과를 Fig. 4-43에 나타내었다. 또한 장기하중에 가장 큰 영향을 끼치는 두 조건의 확률분포를 그래프에 함께 나타내었다. 실선기준 5시간의 모형실험 결과는 수렴된 하중 분포결과를 얻기에 부족함을 이미 4.3장에서 이미 확인하였고, 수렴되지 않은 각 환경조건 별 하중 분포결과는 장기하중 예측 결과에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 실험수행시간을 넘지 않는 수준의 재현기간에서의 하중 예측 값은 각 5시간 실험결과가 큰 격차를 보이지 않더라도, 보다 긴 1년 혹은 100년 등 긴 재현기간에 해당하는 슬로싱 하중 예측 시 각각의 5시간 실험 데이터 조합간 차이가 커져 결과적으로 긴 재현기간을 갖는 하중을 추정할수록 5시간 실험간 격차가 더욱 커진다 (Fig. 4-44).



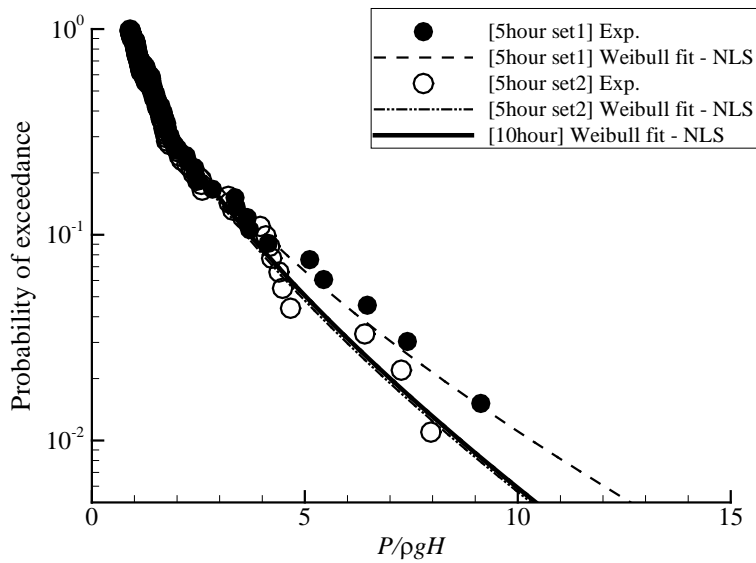


(a) 5hour set No.1

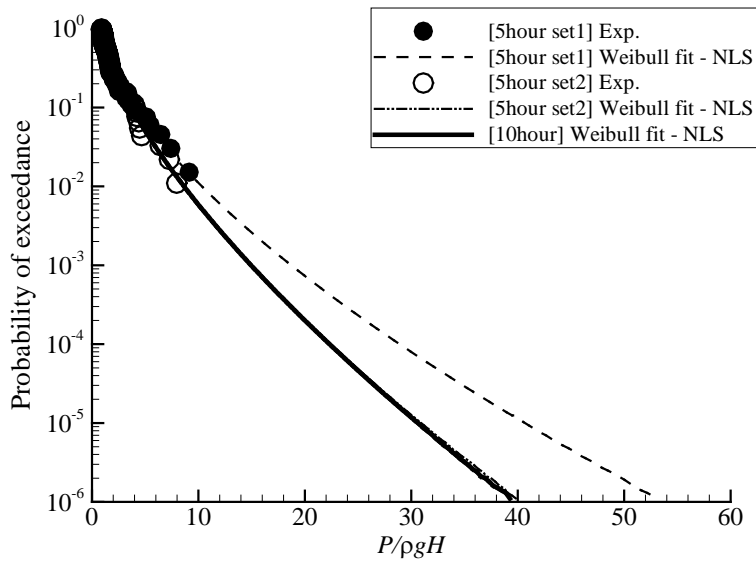


(b) 5hour set No.2

Fig. 4-43 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, P06



(a) Probability range: Simulation time (5hour)



(b) Probability range: life time of tank

Fig. 4-44 Comparison of short-term probability distribution of

sloshing load, 5hour test and 10hour test, filling=0.95H, heading=150deg,

$T_z=6.0s$ ,  $H_s=3.5m$ , P06

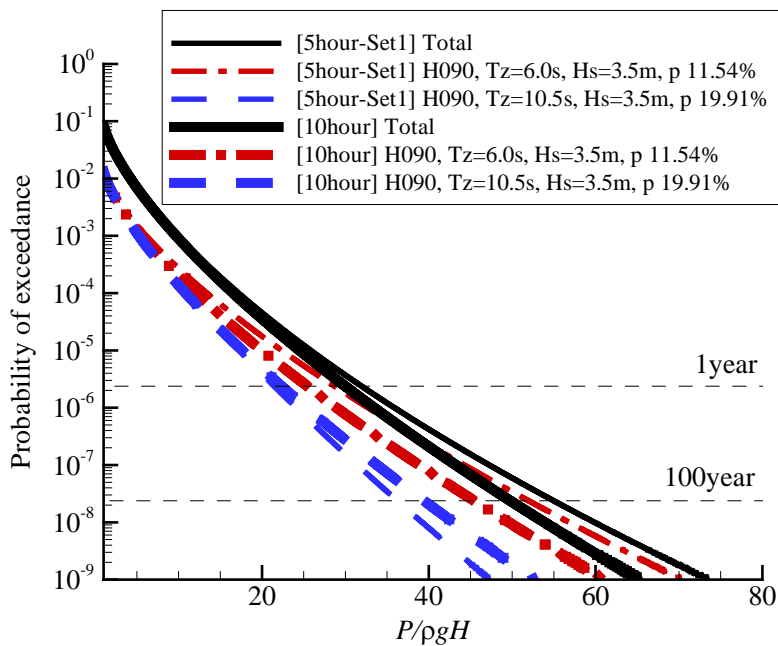
Table 4-11 Comparison of probable extreme pressures based on 5hour

and 10hour test data, w/ outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg

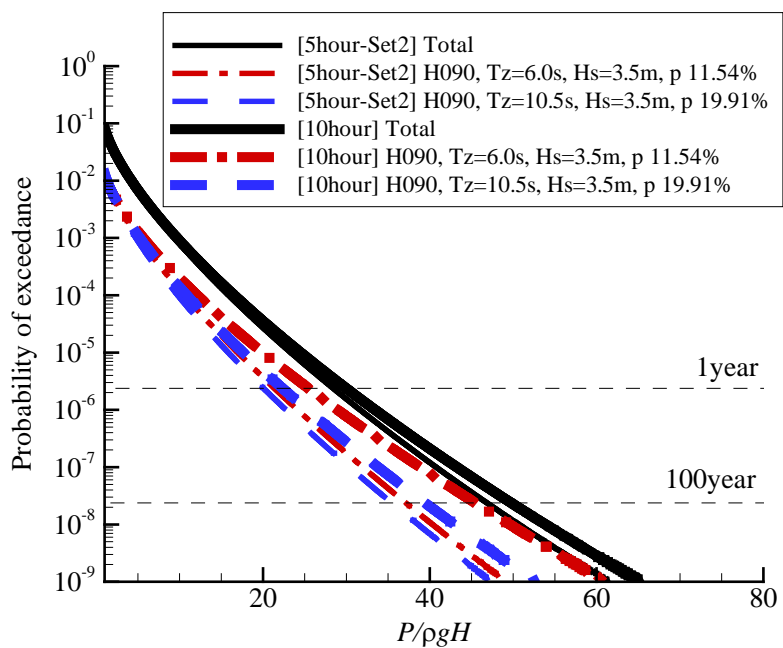
Panel 06					
	5hour-1st	5hour-2nd	10hour	5hour-1st /10hour	5hour-2nd /10hour
P <sub>1day</sub>	3.09	3.36	3.21	0.96	1.05
P <sub>1year</sub>	17.38	17.43	15.79	1.10	1.10
P <sub>10year</sub>	26.05	24.89	22.47	1.16	1.11
P <sub>100year</sub>	36.55	33.24	30.03	1.22	1.11
P <sub>1000year</sub>	48.78	42.39	38.42	1.27	1.10
Panel 08					
	5hour-1st	5hour-2nd	10hour	5hour-1st /10hour	5hour-2nd /10hour
P <sub>1day</sub>	1.02	1.20	1.11	0.92	1.08
P <sub>1year</sub>	8.04	6.93	6.63	1.21	1.05
P <sub>10year</sub>	13.47	10.97	10.57	1.27	1.04
P <sub>100year</sub>	20.29	15.73	15.69	1.29	1.00
P <sub>1000year</sub>	28.46	21.12	22.51	1.26	0.94
Panel 12					
	5hour-1st	5hour-2nd	10hour	5hour-1st /10hour	5hour-2nd /10hour
P <sub>1day</sub>	1.62	1.87	1.71	0.95	1.09
P <sub>1year</sub>	28.16	17.43	20.15	1.40	0.86
P <sub>10year</sub>	49.29	28.26	33.11	1.49	0.85
P <sub>100year</sub>	78.01	41.39	48.84	1.60	0.85
P <sub>1000year</sub>	115.62	56.68	67.15	1.72	0.84

적재조건 0.15H에서 탱크 측면 벽의 하단부에 위치한 P19

지역에서 나타나는 슬로싱 하중의 장기예측 결과이다. 환경 조건에 따라 상대적으로 짧은 실험시간(5시간)이 장기하중 예측에 미치는 영향이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4-45). 실험수행간을 넘지 않는 수준의 재현기간에서의 하중 예측값은 각 5시간 실험결과가 큰 격차를 보이지 않더라도, 보다 긴 1년 혹은 100년 등 긴 재현기간에 해당하는 슬로싱 하중 예측 시 두 실험결과간의 차이가 커져 결과적으로 장기하중을 예측을 추정할 경우 길어짐에 따라 그 격차도 함께 벌어지게 된다 (Fig. 4-46).

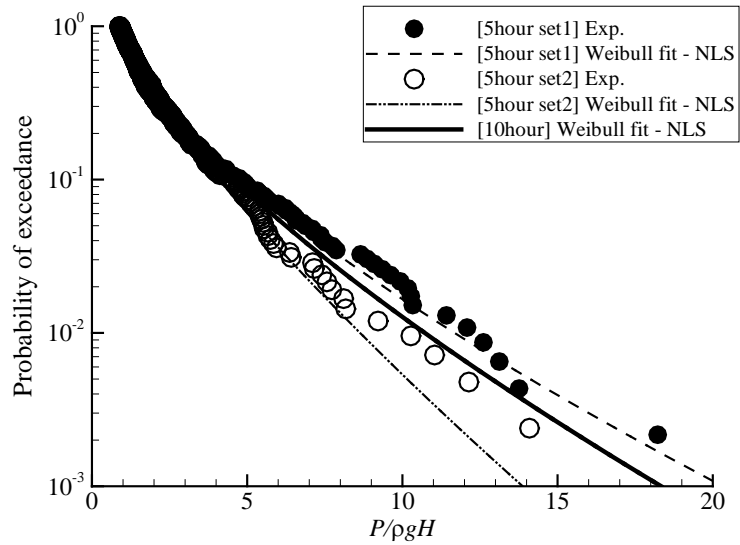


(a) 5hour set No.1

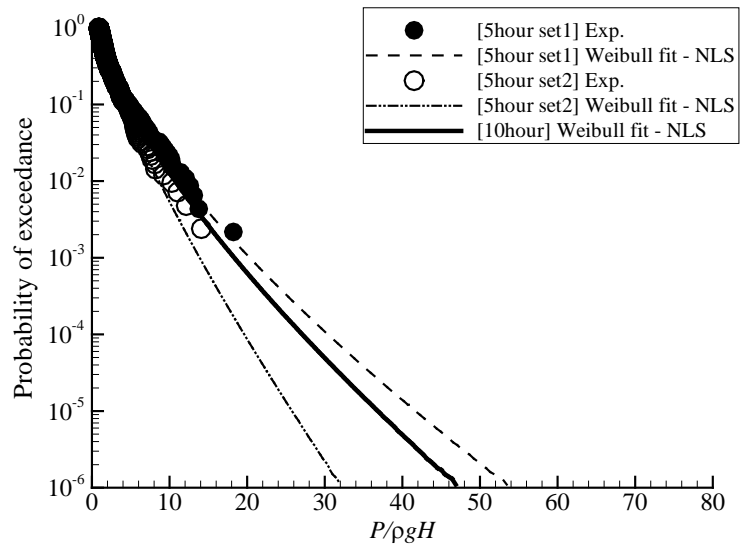


(b) 5hour set No.2

Fig. 4-45 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, w/o outlier analysis, filling=0.15H, heading=90deg, P18



(a) Probability range: Simulation time (5hour)



(b) Probability range: life time of tank

Fig. 4-46 Comparison of short-term probability distribution of sloshing load, 5hour test and 10hour test, filling=0.15H, heading=90deg,  $T_z=6.5s$ ,  $H_s=3.5m$ , P18

Table 4-12 Comparison of probable extreme pressures based on 5hour and 10hour test data, w/ outlier analysis, filling=0.15H, heading=90deg

Panel 11					
	5hour-1st	5hour-2nd	10hour	5hour-1st /10hour	5hour-2nd /10hour
P <sub>1day</sub>	4.20	4.19	4.16	1.01	1.01
P <sub>1year</sub>	10.19	12.36	10.27	0.99	1.20
P <sub>10year</sub>	13.10	16.44	12.92	1.01	1.27
P <sub>100year</sub>	16.57	21.14	15.68	1.06	1.35
P <sub>1000year</sub>	20.85	26.57	18.55	1.12	1.43
Panel 18					
	5hour-1st	5hour-2nd	10hour	5hour-1st /10hour	5hour-2nd /10hour
P <sub>1day</sub>	11.49	10.66	11.10	1.03	0.96
P <sub>1year</sub>	33.66	29.67	31.41	1.07	0.94
P <sub>10year</sub>	44.76	38.61	41.03	1.09	0.94
P <sub>100year</sub>	57.12	48.35	51.47	1.11	0.94
P <sub>1000year</sub>	70.64	58.98	62.72	1.13	0.94
Panel 22					
	5hour-1st	5hour-2nd	10hour	5hour-1st /10hour	5hour-2nd /10hour
P <sub>1day</sub>	3.85	3.55	3.68	1.05	0.96
P <sub>1year</sub>	12.13	15.57	11.56	1.05	1.35
P <sub>10year</sub>	16.83	23.80	15.95	1.05	1.49
P <sub>100year</sub>	22.13	33.60	20.89	1.06	1.61
P <sub>1000year</sub>	27.93	44.81	26.34	1.06	1.70

#### 4.5.2 이상치 분석 여부에 따른 장기 슬로싱 하중 비교

본 연구에서 제시하는 슬로싱 하중의 장기 예측 프로시저는 모형실험 결과의 신뢰성 향상을 위해 이상치 해석을 수행할 것을 권고하였다. 아래에 동일한 모형실험 데이터를 바탕으로 본 연구에서 제안하는 이상치 해석절차를 따른 경우와 기존의 이상치 해석을 수행하지 않는 해석절차를 따른 경우에 각각의 해석절차가 예측하는 슬로싱 하중의 장기확률분포의 차이를 살펴보았다.

Fig. 4-47은 적재깊이 0.95H 조건의 장기 슬로싱 하중의 확률분포 예측 결과이다. 각 조건별로 실선기준 2회의 반복실험 결과를 취합한 데이터를 바탕으로 해석을 수행하였다. 이상치 해석을 수행한 데이터를 굵은선, 수행하지 않은 데이터를 가는 선으로 나타내었다.

가장 큰 장기하중이 나타난 P12 위치에서는 이상치 해석을 수행한 결과가 이상치 해석을 수행하지 않는 기존의 절차를 따른 결과보다 동일한 초과확률조건에서 더 큰 슬로싱 장기하중을 예측하는 것을 알 수 있다. 장기 하중결과에 가장 큰 영향을 끼친 환경조건은  $T_z=7.5s$ ,  $H_s=7.5m$  실험결과로, 해당 모형실험데이터에 대하여 이상치 해석의 수행 여부에 따른 슬로싱 하중의 확률분포도 차이를 비교하여 Fig. 4-48 그래프에 나타내었다. 그래프를 통해 확인할 수 있듯이 이상치 해석 수행을 통해 일부 관측값의 크기가 축소 조정되었다.



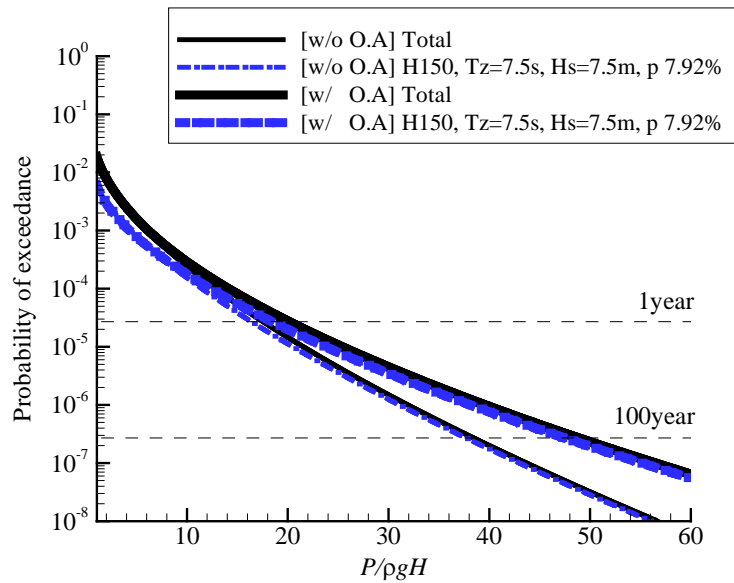
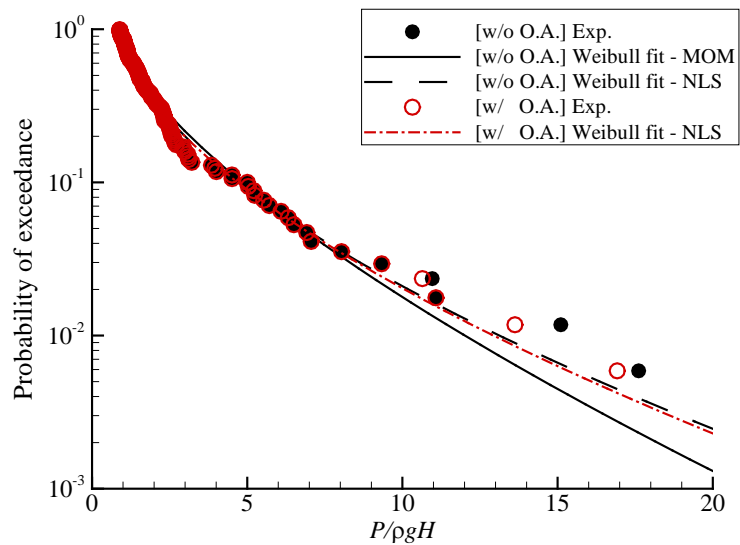
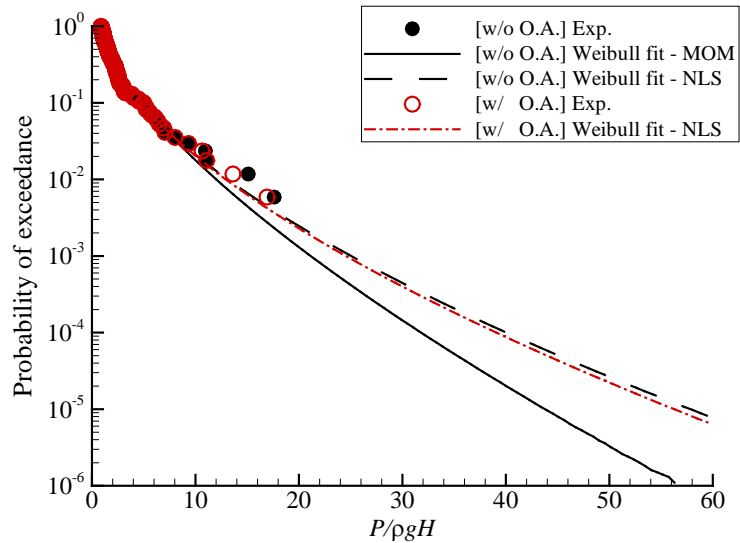


Fig. 4-47 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, P12



(a) Probability range: Simulation time (5hour)



(b) Probability range: life time of tank

Fig. 4-48 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg,  $T_z=7.5s$ ,  $H_s=7.5m$ , P12

탱크 전면부 격벽에 위치한 P08에 나타나는 슬로싱 하중 분석 결과 이상치 해석을 수행 유무에 따라 뚜렷한 결과의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 두 해석법의 결과가 차이를 보이는 환경조건은  $T_z=7.5s$ ,  $H_s=11.1m$  조건으로 실험결과로, 10시간의 모형실험동안 전반적인 경향에서 벗어나는 압력값을 보이는 관측치가 2번 나타났다. 해당 관측치의 압력신호를 살펴보면 실험오류에 의한 이상치나 작은 임펄스 면적을 갖는 비관심 이상치는 아닌 것을 알 수 있다 (Fig. 4-51). 이는 결국 실험결과의 수렴성에 의한 함수근사 이상치로 판단할 수 있다. 이상치 해석을 수행하지 않는 기존의 방법 적용 시 전체 경향과

다른 특징을 보이는 큰 압력값을 갖는 두 관측치의 영향으로 분포함수가 상대적으로 작은 형상 모수를 추정하게 되었으며 (Table 4-13), 이는 장기 하중 예측결과가 비현실적으로 보수적인 결과를 갖도록 하였다. 반면 이상치 해석을 수행할 경우 이상치의 영향이 현저히 감소하여 근사한 분포함수가 전체적인 경향을 따르는 방향으로 조정되었다.

Table 4-13 Comparison of fitting parameters, w/o & w/ outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08

	W/o outlier analysis	W/ outlier analysis
Location parameter	1.1152	0.8911
Scale parameter	0.1674	0.5621
Shape parameter	0.4421	0.8735

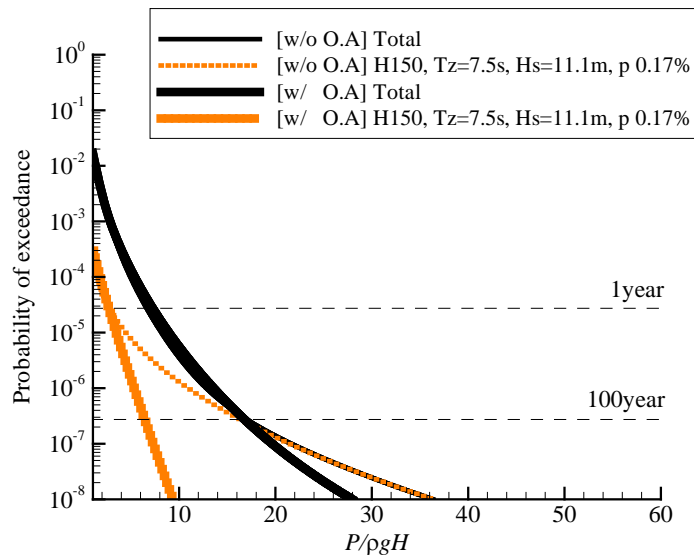
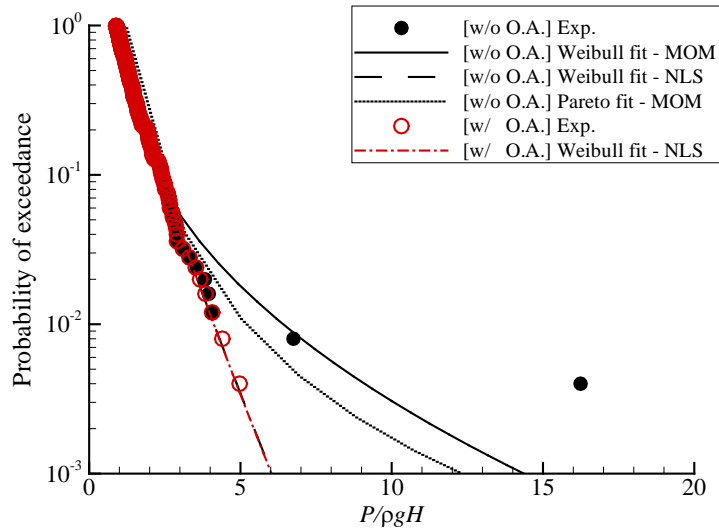
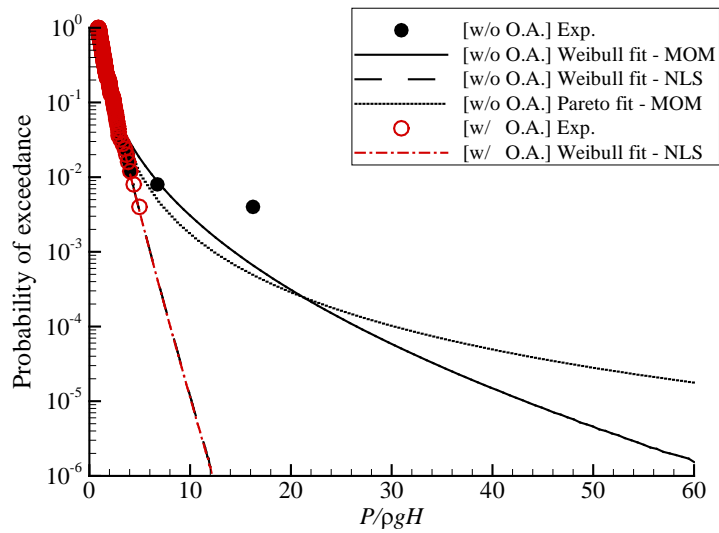


Fig. 4-49 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg, P08

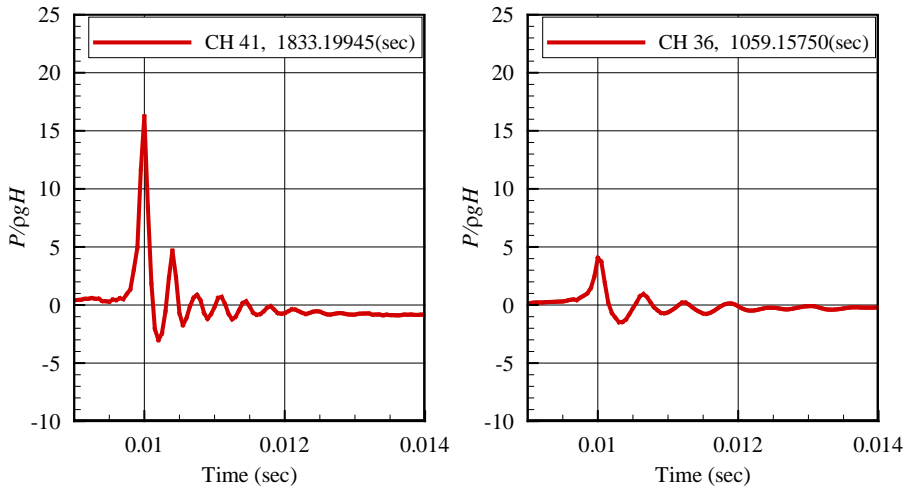


(a) Probability range: Simulation time (5hour)



(b) Probability range: life time of tank

Fig. 4-50 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis, filling=0.95H, heading=150deg,  $T_z=7.5s$ ,  $H_s=11.1m$ , P08

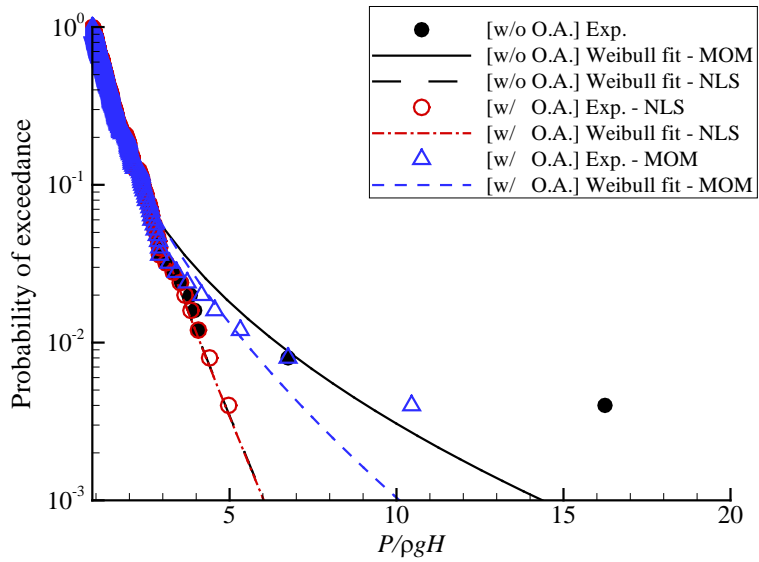


(a) 1<sup>st</sup> largest peak (b) 3<sup>rd</sup> largest peak  
Fig. 4-51 Representative impact signals from model test, filling=0.95H,

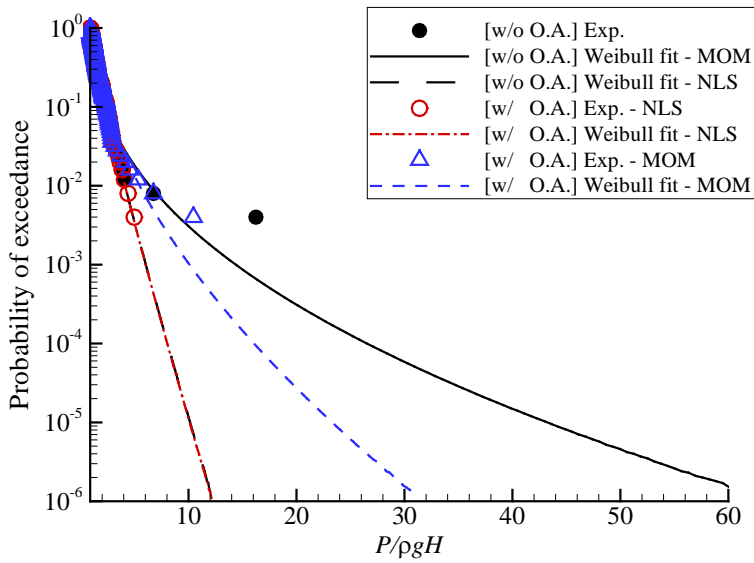
Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08

본 논문에서 정의한 이상치 해석법은 기본적으로 최소 제곱법을 이용한 극치 분포함수 근사를 통해 도출된 잔차의 분포를 바탕으로 수행되므로 함수근사 방법이 최소 제곱법으로 제한된다는 한계점이 존재한다. 기존의 MOM 방법에 대해서도 잔차를 도출하여 사분위수 법을 적용, 이상치를 탐지, 조정할 수 있으나 함수 근사에 관계하지 않는 잔차를 도출하여 활용한다는 점 등에서 다소 논리적 비약이 존재한다. 아래의 그래프는 앞서 살펴본 NLS 방법을 사용한 이상치 해석법과 MOM 방법을 사용한 이상치 해석법이 도출하는 결과의 차이를 초과확률분포도로 비교한 결과이다. NLS 방법의 경우 전체의 경향에서 크게 벗어나는 2개의 관측치만을 이상치로 판단, 조정된 것을 확인할 수 있으며 MOM 방법을 사용한 경우 실험값의 분포형상을 잘

따르는 약 10개 정도의 상위 관측치가 모두 이상치로 판단되어 압력값이 조정된 것을 확인 할 수 있다. MOM 방법의 경우 초기의 함수근사 결과에 있어 이상치가 큰 영향을 미치기 때문에 이를 기준으로 잔차를 계산, 관측치 조정을 할 경우 NLS 방법을 사용한 이상치 해석법에 비하여 이상치 이외의 관측값이 조정될 가능성이 큰 것으로 보인다. NLS 방법 이외의 함수근사 방법을 이용한 이상치 해석법에 대해서는 문제의 정식화 및 방법론 검토 등 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.



(a) Probability range: Simulation time (5hour)



(b) Probability range: life time of tank

Fig. 4-52 Comparison of long-term probability distribution of sloshing load, w/ and w/o outlier analysis with two different fitting methods, filling=0.95H, heading=150deg, Tz=7.5s, Hs=11.1m, P08

## 5. 결론

본 연구에서는 슬로싱 하중 장기 예측을 절차를 개발하였다. 우선적으로 기존에 정립된 국제 선급 및 국내 조선소의 슬로싱 해석 절차 조사를 바탕으로 기존의 절차들이 갖는 문제점을 파악하여 효율적이고 해석 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 장기 슬로싱 하중 예측 절차를 제안하였다. 제안한 슬로싱 하중의 장기 예측 절차를 기반으로 LNG 운반선의 화물창에 적용 결과를 기존의 절차를 적용한 결과와 비교하여 본 연구에서 제안하는 슬로싱 하중의 장기 예측 방법의 효용성을 검토하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 슬로싱 해석조건 선정의 기준, 실험 수행 방법등과 같이 향후 데이터 처리를 통해 수정할 수 없는 사안들에 대하여 각 기관이 제안 하고 있는 해석 절차가 차이를 보인다.
- 모형실험을 통한 슬로싱 하중 장기 예측에 있어 슬로싱 해석조건 선정, 모형실험 수행, 실험결과의 해석 등의 주요 사안과 관련하여 국내조선소 및 국제선급이 공통적으로 합의할 수 있는 수준의 절차 구축이 필요하다. 본 연구에서는 이에 대하여 합리적인 수준에서의 슬로싱 하중 장기예측 절차를 개발하였다.
- 모형실험에서 계측한 실험데이터는 실험시설, 실험조건 등 다양한 이유로 인하여 이상치를 포함할 가능성이 있다. 그러



므로 실험결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 모형실험 데이터의 해석 시 이상치 분석을 수행할 필요가 있다.

- 슬로싱 모형 실험의 결과물인 압력데이터에서 나타날 수 있는 이상치는 실험의 오류에 의한 이상치, 비관심 이상치, 수렴성 부족에 의한 이상치의 세가지 계열로 나눌 수 있으며, 이에 대하여 각기 다른 탐지 방법 및 처리 방법을 적용해야 한다.
- 압력의 피크치에 비하여 상대적으로 작은 임펄스 면적을 갖는 충격 관측치는 압력센서에 작은 물방울이 충격을 가해서 발생하는 것으로 실험을 통해 파악하고자 하는 탱크 내 적재된 유체 전반의 자유표면운동에 의해 발생하는 충격과는 다른 특성의 관측치이다. 압력의 피크 치에 기반한 하중 추정 절차에서는 통계 표본에서 제외하는 것이 바람직하다.
- 슬로싱 하중의 장기 예측에 있어 각 해상조건의 발현빈도 또한 중요한 역할을 한다. 전반적으로 큰 슬로싱 하중을 보이는 환경조건은 상대적으로 발생 빈도가 낮아 장기 하중 예측에 미치는 영향이 적은 경우가 많다. 결국 장기적 관점에서 화물창에 나타나는 슬로싱 하중의 확률분포를 살펴보기 위해서는 발현빈도를 고려한 하중 분포 곡선을 기준으로 기여도를 살펴보아야 한다.
- 기존의 통계 해석법은 모형실험의 수렴성 부족으로 인해 나타나는 이상치로 인해 잘못된 해석결과를 도출할 가능성이 크다. 기존의 연구에서 가장 많이 사용되는 모멘트법을 사용한 함수근사방법은 소수의 이상치 유무에 따라 근사 결과가

민감하게 변화하며 실험결과로부터 외삽된 확률수준에서의 하중 예측을 필요로 하는 장기 예측에서 이러한 이상치는 해석결과에 큰 영향을 미친다.

- 슬로싱 하중의 확률분포모델 근사에 있어 비선형 회귀분석법을 수행할 경우 수렴성이 부족한 실험데이터에서 발생하는 이상치의 영향을 감소시킬 수 있다. 또한 본 연구에서 개발한 함수근사 이상치 해석을 수행할 경우 이상치로 인해 발생하는 해석결과의 왜곡을 줄여, 동일한 모형실험 데이터를 바탕으로 보다 신뢰도 높은 장기하중을 예측할 수 있다.

## 6. 참고문헌

- [1] American Bureau of Shipping. 2009. Guidance notes on strength assessment of membrane-type LNG carriers. Guidance Note, Houston, Texas, USA.
- [2] Ahn, Y., Kim, S.Y., Kim, K.H., Lee, S.W., Kim, Y., and Park, J.J. 2012. Study on the Effect of density Ratio of Liquid and Gas in Sloshing Experiment. Proceeding of 22th International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece.
- [3] Ahn, Y., Kim, K.H., Kim, S.Y., Lee, S.W., Kim, Y. and Lee, J.H. 2013. Experimental Study on the Effects of Pressure Sensors and Time Window in Violent Sloshing Pressure Measurement. Proceeding of 23th International Offshore and Polar Engineering Conference, Anchorage, Alaska, USA.
- [4] Bogaert, H., Léonard, S., Brosset, L., Kaminski, M.L. 2010. Sloshing and Scaling: Results from the SlosheL Project. Proceeding of 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China.
- [5] Brosset, L., Mravak, Z., Kaminski, M., Collins, S. and Finnigan, T. 2009. Overview of SlosheL project. Proceeding of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan.
- [6] Bruffaerts, C., Verardi, V. and Vermandele, C. 2014. A generalized boxplot for skewed and heavy-tailed distributions. Statistics & Probability Letters, 95:110-117.
- [7] Bureau Veritas. 2010. Design Sloshing Loads for LNG Membrane Tanks. Guidance Note NI 554, Paris, France.
- [8] Bury, K.V. 1975. Statistical Models in Applied Science. Wiley, New York.

- [9] Cox, P.A., Bowles, E.B., and Bass, R.L. 1980. Evaluation of liquid dynamic loads in slack LNG cargo tanks. *SNAME Transactions*, 88: 103-126.
- [10] Czuber, E. 1891. *Beobachtungsfehler*, Leipzig.
- [11] DNV-GL. 2016. *Sloshing analysis on LNG Membrane Tanks Class Guideline*, Oslo, Norway.
- [12] Dixon, W.J. 1953. Processing Data for Outliers. *Biometrics*, 9(1): pp 74-89.
- [13] Dorigo, M. 1992. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- [14] Efron, B. 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The annals of Statistics*, 7(1): 1-26.
- [15] Faltinsen, O.M., Olsen, H., Abramson, H.N., and Bass, R.L. 1974. *Liquid sloshing in LNG Carries*. Technical Report. No. 85, Det Norske Veritas.
- [16] Faltinsen, O.M. and Timokha, A.N., 2009. *Sloshing*. Cambridge University Press, New York, USA.
- [17] Fillon, B., Diebold, L., Henry, J., Derbanne, Q., Baudin, E. and Parmentier, G. 2011. Statistical Post-Processing of Long-Duration Sloshing Test. *Proceeding of 21th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, Hawaii.
- [18] Frihat, M., Brosset, L. and Ghidaglia, J.M. 2017. Experimental Study of Surface Tension Effects on Sloshing Impact loads. *The 32nd International Workshop on Water and Floating Bodies*, Dalian, China.
- [19] Gasser, T., Sroka, L. and Jennen-Steinmetz, C. 1986. Residual Variance and Residual Pattern in Nonlinear Regression. *Biometrika*, 73(3): 625-633.
- [20] Gavory, T. 2005. Innovative Tools Open up New Prospects for Liquid Motion Model Tests. *Proceedings of Gastech*, Bilbao, Spain.

- [21] Gervaise, E., de Sèze, P-E. and Maillard, S. 2009. Reliability-Based Methodology for Sloshing Assessment of Membrane LNG Vessels. Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan.
- [22] Gou, Y., Kim, Y., Kim, S.Y., Kim, K.H. and Ahn, Y.J. 2011. Study on Sloshing Severity Prediction: Computation vs. Experiment. The 7th International Workshop on Ship Hydrodynamics, Shanghai, China.
- [23] Graczyk, M., Moan, T. and Rognesbakke O. 2006. Probabilistic Analysis of Characteristic Pressure for LNG Tanks Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 128: 133-144.
- [24] Graczyk, M. and Moan, T. 2007. A probabilistic assessment of design sloshing pressure time histories in LNG tanks. Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [25] Gran, S. 1981. Statistical distributions of local impact pressures in liquid sloshing. Norwegian Maritime Research.
- [26] Grubbs, F.E. 1969. Procedures for identifying outlying observations in samples. Technometrics, 11: 1-21.
- [27] Gumbel, E.J. 1958. Statistics of Extremes. Dover Publications, Inc.
- [28] Hubert, M. and Vandervieren, E. 2008. An adjusted boxplot for skewed distributions. Computational Statistics & Data Analysis, 52(12): 5186-5201.
- [29] Julien Hoffman. 2015. Biostatistics for Medical and Biomedical Practitioners. Elsevier.
- [30] Kuo, J.F., Campbell, R.B., Ding, Z., Hoie, S.M., Rinehart, A.J., Sandström, R.E., Yung, T.W., Greer, M.N. and Danaczko, M.A. 2009. LNG Tank Sloshing Assessment Methodology-The New Generation. Proceeding of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan.
- [31] Kim, J.W., Kim, K., Kim, P.S. and Shin, Y.S. 2005. Sloshing-Ship

- Motion Coupling Effect for the Sloshing Impact Load on the LNG Containment System, ABS Technical Papers, Houston, Texas, USA.
- [32] Kim, J. W. and Kim, K. 2007. Response-Based Evaluation of Design Sloshing Loads for Membrane-Type LNG Carriers. OMAE, San Diego, USA.
- [33] Kim Y., Kim S.Y. and Yoo, W.J. 2010. Statistical Evaluation of Local Impact Pressures in Sloshing. Proceeding of 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China.
- [34] Kim, S.Y., Kim, K.H. and Kim, Y. 2012. Comparative Study on Model-Scale Sloshing Tests. Journal of Marine Science and Technology, 17(1): 47-58.
- [35] Kim, Y., Kim, S.Y., Kim, J., and Lee, J.H. 2013. Comparison of Sloshing Pressures in 2D and 3D Tanks, The 8th International Workshop on Ship Hydrodynamics, Seoul, Korea.
- [36] Kim, S.Y., Kim, K.H. and Kim, Y. 2015. Comparative Study on Pressure Sensors for Sloshing Experiment. Journal of Ocean Engineering, 94: 199-212.
- [37] Kim, S.Y., Kim, Y. and Kim, K.H. 2014. Statistical Analysis of Sloshing-Induced Random Impact Pressures. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 228(3): 235-248.
- [38] Kim, Y., Lee, J.K., Kim, J. 2017. Experimental Observation on the Effects of Liquid Temperature and Bubbles on Impact Pressure Inside Gas Pocket, Accepted.
- [39] Kimmoun, O., Ratouis, A. and Brosset, L. 2010. Sloshing and Scaling: Experimental Study in a Wave Canal at Two Different Scales. Proceeding of 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China. ~~ISOPE, Vol 3, pp88-97.~~
- [40] Lloyd's Register. 2009. Sloshing Assessment Guidance Document for

Membrane Tank LNG Operations. Guidance Note, London, UK.

- [41] Lu, H.L., Chen, C.H. and Wu, J.W. 2004. A note on weighted least-squares estimation of the shape parameter of the Weibull distribution. *Quality and Reliability Engineering International*, 20: 579–586.
- [42] Lugni, C., Brocchini, B. and Faltinsen, O.M. 2006. Wave impact loads: The role of the flip-through. *Physics of Fluids*, 18(12): 1-18.
- [43] Mathiesen, J. 1976. Sloshing loads due to random pitching. *Norwegian Maritime Res*, 4(3): 2-13.
- [44] Makkonen, L. 2008. Bringing Closure to the Plotting Position Controversy. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 37(3): 460-467.
- [45] Motulsky, H. and Christopoulos, A. 2004. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: A practical guide to curve fitting. Oxford University Press.
- [46] Maillard, S. and Brosset, L. 2009. Influence of Density Ratio between Liquid and Gas on Sloshing Model Test Results. *Proceeding of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan.
- [47] Nho, I.S., Ki1, M.S., Lee, J.M., and Kim, S.C. 2011. A Study on the Sloshing Impact Response Analysis for Insulation System of Mark III LNG Cargo Containment System, *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, Hawaii, USA.
- [48] Mehl, B. Oppitz, J., and Schreier, S. 2013. Sensitivity Study on the Influence of the Exciting Motion in Liquid Sloshing in a Rectangular Tank. *Proceedings of the 23rd Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, Anchorage, USA
- [49] Neugebauer, J., Liu, S., Potthoff, R., Moctar, O. 2017. Investigation of the Motion Accurac Influence on Sloshing Model Test Results. *Proceedings of the 27th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA.

- [50] Olsen, H. and Hysing, T. 1974. A study of dynamic loads caused by liquid sloshing in LNG tanks. DNV Report. No. 74-276-C.
- [51] Pickands J. III. 1975. Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. *The Annals of Statistics*, 3(1): 119-131.
- [52] Ryu, M.C., Jung, J.H., Jeon, S.S., Hwang, Y.S., Han, S.K., Kim, Y.S., Cho, T.I. and Kwon, S.H. 2009. Reference Load for a Conventional 138k CBM LNG Carrier in a Comparative Approach. *Proceeding of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA.
- [53] Repalle, N., Truong, T., Thiagarajan, K., Roddier, D., Seah, R.K.M. and Finnigan, T. 2010. The Effect of Sampling Rate on the Statistics of Impact Pressure. *Proceeding of 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China.
- [54] Ryan, T.P. 1997. *Modern Regression Methods*. Wiley, New York.
- [55] Seymour, L. and Marc, L.L. 2000. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Probability*. Mc Graw Hill.
- [56] Heo, J.H., Kho, Y.W., Shin, H., Kim, S. and Kim, T. 2008. Regression Equations of Probability Plot Correlation Coefficient Test Statistics from Several Probability Distributions. *Journal of Hydrology*, 355(1): 1-15.
- [57] Ryu, M.C., Jung, J.H., Jeon, S.S., Hwang, Y.S., Han, S.K., Kim, Y.S., Cho, T.I. and Kwon, S.H. 2009. Reference Load for a Conventional 138k CBM LNG Carrier in a Comparative Approach. *Proceeding of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA
- [58] Shin, Y.S., Kim, J.W, and Wang, B. 2006. First principle-based analysis procedure for strength assessment of membrane-type LNG containment system due to sloshing impact. *American Bureau of Shipping*, USA.
- [59] Schlueter, M., Egea, J.A., Banga, J.R. 2009. *Extended Ant Colony*



- Optimization for non-convex Mixed Integer Nonlinear Programming. Computers & Operations Research, 36(7): 2217-2229.
- [60] Schlueter, M., Erb, S., Gerdt, M., Kemble, S. and Rückmann, J.J. 2013. MIDACO on MINLP Space Applications. Advances in Space Research, 51(7): 1116–1131
- [61] Tukey, J.W. 1977. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Publishing Co.
- [62] Wemmenhove, R., Luppens, R., Veldman, A.E.P. and Bunnik, T. 2007. Numerical Simulation of Sloshing in LNG Tanks with a Compressible Two-Phase Model. Proceeding of 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California USA.
- [63] Yang, K.K., Kim, J., Kim, Y., Kim, S.Y. and Zhang, Zu. 2016. PIV Measurement of Violent Sloshing Flows and Comparison with CFD Computations. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 26(3): 251-262.
- [64] Zheng, M., Kim, Y., Kim, S.Y. and Ahn, Y.J. 2013. Study on Prediction of Sloshing Severity. The 23th International Ocean (Offshore) and Polar Engineering Conference, Alaska, USA.

## **Abstract**

# **Development of Long-term Prediction Procedure and Outlier Analysis for Sloshing Impact Loads on LNG Cargo Tank**

Sang-Yeob Kim

Department of Naval Architecture and Ocean

Engineering

College of Engineering

Seoul National University

This paper deals with the development of a long-term prediction procedure for sloshing loads in LNG cargo based on experimental approach. Due to the recent technological advancement and economical reasons, the LNG carriers are becoming larger and larger, and the size of the LNG storage tanks naturally increases. As the size of the tank increases, the resonance period of the flow inside the tank becomes closer to the periods of the ship motion, and precise prediction of the sloshing load has become one of the key issues to be considered in the design stage of the ship.

There have been many previous studies on the experimental approach

of the sloshing problem, and the International Classification Society has recently introduced a guide to analysis procedure for sloshing load prediction. However, since the analysis procedures proposed by each institute are different from each other, it is difficult to carry out the experiments satisfying the standards of all the institutes because the criteria of the selection of the experimental conditions, the experiment release and the test methods are unclear. Also, the procedure of deriving the design load based on the experimental results was also different, and it was possible to derive different results based on the same experimental data.

In this study, we develop a procedure for long-term sloshing load prediction. The study propose an improved long-term sloshing load prediction procedure which can identify the common points and problems of the existing procedures and increase the reliability of the analysis results by examining the sloshing analysis procedures of the existing international classifications and domestic shipyards.

Developed long-term prediction procedure was adopted to the cargo hold of the LNG carrier in operation. The long-term sloshing load results derived from the developed procedure are compared with the results which applied the conventional procedure for the same model, and the effectiveness of the proposed long-term sloshing load method is investigated. Based on the long-term model test data, we confirmed that the proposed method can provide more reliable results based on the same experimental results.

**Keywords: Sloshing, Sloshing model test, Long-term analysis, Post-processing, Statistical analysis, Convergence**  
**Student Number: 2012-30284**

## 기호 정리

$A$	파 진폭
$B$	화물창의 폭
$D$	손상지수 (damage index)
$H$	화물창의 높이
$H_{u.c.}$	화물창의 상부 챔퍼 높이
$H_{l.c.}$	화물창의 하부 챔퍼 높이
$H_s$	유의파고
IQR	사분위수 범위
$L$	화물창의 길이
$P$	슬로싱 충격압력의 피크치
$Q_1$	표본집단의 제 1사분위수
$Q_2$	표본집단의 제 2사분위수
$Q_3$	표본집단의 제 3사분위수
$Q_4$	표본집단의 제 4사분위수
$Q(x)$	$x$ 에 대한 초과확률
$S$	슬로싱 충격압력의 와도 (skewness)
$T_z$	평균 파 주기
$T_r$	충격압력 상승시간
$T_d$	충격압력 하강시간
$T_{duration}$	충격압력의 지속시간
$V$	선박 전진 속도

$V_{design}$	선박의 설계속력
$e$	관측값과 추정값 사이의 오차
$r$	회귀분석 잔차 (residual)
$\alpha_r$	충격압력 상승시간 계수
$\alpha_d$	충격압력 하강시간 계수
$\delta$	Weibull 분포함수의 위치 모수 (location parameter)
$\beta$	Weibull 분포함수의 척도 모수 (scale parameter)
$\gamma$	Weibull 분포함수의 형상 모수 (shape parameter)
$\mu$	평균
$\sigma^2$	분산
$\gamma_1$	와도
$S_\eta$	파 스펙트럼
$\omega$	파 진동수
$\omega_e$	조우 진동수
$\varepsilon$	파 위상각
$\phi$	운동 위상각
$g$	중력 가속도
$\zeta$	파 변위
$\xi$	선박 운동 변위
$\lambda$	이상치 판별 계수
L	이상치 탐지 및 처리 반복 횟수